

## 昭和基地建物の不燃化に伴う構造材料としての 石膏の力学的特性

佐藤稔夫\*・平山善吉\*・岡田 満\*

### Mechanical Properties of Gypsum as the Structural Material with the Advance of Inflammability of Building at Syowa Station

Toshio SATO\*, Zenkichi HIRAYAMA\* and Mituru OKADA\*

**Abstract:** On the occasion of selecting structural materials for constructions at Syowa Station in Antarctica, the authors considered that gypsum was the most promising one as the main structural material and investigated its mechanical performance over a wide range of temperatures between  $-20^{\circ}\text{C}$  (lowest) and  $+20^{\circ}\text{C}$  (normal). The purpose of this paper is to confirm the possibility of applying gypsum to construction. Therefore, the test program was made for beams, columns and framed structures of gypsum.

In addition to it, the same test program was made for concrete and reinforced concrete members in order to compare those results. Furthermore, the comparative study of the test values and theoretical ones was conducted.

The following conclusions were obtained from the above-mentioned experimental study.

- (1) Gypsum shows good performance against low temperatures.
- (2) It fulfills mechanical functions well as a composite material combined with light gravels and deformed bars.
- (3) Reinforced gypsum members give relatively high strengths as the structural members.
- (4) Reinforced gypsum members show similar restoring-force characteristics and failure mechanism to those of reinforced concrete members.

**要旨:** 南極昭和基地で使用する構造材料の選定について、主材料を石膏に設定し、その性質について、低温 ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) から常温 ( $+20^{\circ}\text{C}$ ) までの諸性能を調べた。また、鉄筋補強軽量石膏部材の、構造材料としての有用性を総合的に把握するため、梁、柱およびラーメンの構造実験を行い、あわせて同一供試体のコンクリート、あるいは、鉄筋コンクリート部材と比較して、その挙動を調べ、それぞれについて実験値と理論値を比較考究した。以上の実験から次の結果を得た。

- (1) 低温に対して優れた特性がある。
- (2) 複合材料としては、軽量骨材および異形鉄筋との組み合わせに、優れた機能を発揮する。

\* 日本大学理工学部建築学教室. Department of Architecture, College of Science and Technology, Nihon University, 8-14, Kanda Surugadai 1-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 101.

- (3) 鉄筋補強軽量石膏部材を構造部材として使用した時、比強度が大きい。
- (4) 復元力特性および破壊性状ともに、鉄筋コンクリート部材とほぼ同じような性能を示した。

## 1. は じ め に

我が国の南極観測も、最初に基地を建設して以来、早くも 25 年が経過しようとしている。我々日本大学南極建築設計委員会（代表 佐藤稔夫・他）は、この間昭和基地に隊員の居住や観測用にいくつかの建物を設計してきた。

これらの建物は、恒久化と不燃化が叫ばれながらも、基地における外的諸条件や、建設機械、作業隊員等々の制約から、特に後者における実現をみずに、今日に至っている。しかし、昭和 57 年度完成予定の新砕氷艦「白瀬」の就航と共に、輸送力の倍増がやっとかなえられるようとしている。

このような段階において、我々は、近い将来の不燃建築として、主材料を石膏に設定した石膏コンクリートが、南極の諸条件に適合する構造材料たり得るか、その可能性を総合的に把握することを目的として、いくつかの実験を行ってきた。

これから取扱う石膏は、我が国ではその資源に乏しく、利用分野が限られていたため、砂を混ぜた石膏プラスターが広義の石膏コンクリートと見なされていた。一方欧米では、石膏資源が豊富で、利用技術にも優れ、砂、人工軽量骨材、木片および各種繊維などで複合、強化された石膏コンクリートが利用されている。

しかし最近では、我が国でも産業廃棄物としての脱硫石膏を有効利用すべきことが、社会的な要求となり、石膏を建築に用いるための材料学的研究は岸谷・平居（1972）、後藤・岡島（1972）等によって報告され、新材料開発への関心が高まりつつあるが、鉄筋で補強された構造部材としての力学的特性に関する研究、あるいは養生温度をパラメーターとした研究等は、筆者等（佐藤他、1975a, b, c, 1976, 1977a, b, 1978, 1979a, b, c）によるもの以外ほとんどその例を見ない。

石膏の種類はコンクリート便覧（1976）によれば表 1.1 のように大きく分けて 6 種類あるとされている。このうち水と練って硬化させることができるのは  $\alpha$  型半水石膏、 $\beta$  型半水石膏および II 型無水石膏で、I 型無水石膏は高温のみで存在し、III 型無水石膏は空気中の湿気を吸着して半水石膏となり、二水石膏は我々が日常建築材料として目にする石膏で、 $\alpha$  型半水石膏、 $\beta$  型半水石膏、II 型無水石膏が水和硬化したものでもある。

本研究で対象とする石膏は、複合材料としてのマトリックス相となる石膏、すなわち水と

表 1.1 石 膏 の 種 類  
Table 1.1. Kinds of gypsum.

種 類			二水石膏	$\alpha$ 型半水石膏	$\beta$ 型半水石膏	I 型無水石膏	II 型無水石膏	III 型無水石膏
分 子 式			$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$		$\text{CaSO}_4$		
大気中の安定条件			常 温	常温～250°C		高温のみ	常温～1000°C	絶乾状態
水 と 練 る と			少量溶ける	急速に水和凝結し 5～20分で硬化する		—	凝結促進剤の作用 で硬化する	—
可能凝結調節時間			—	数分～数時間		—	数十分～数十時間	—
硬 化 体	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	乾燥 吸水	—	300～600	20～80	—	300～600	—
			—	100～300	5～30	—	100～350	—
比 重		乾燥	—	1.4～1.8	0.7～1.2	—	1.5～1.9	—
		吸水	—	1.8～2.0	1.0～1.6	—	1.8～2.0	—

コンクリート便覧 (1976) より抜粋

練って硬化させることが可能な II 型無水石膏,  $\alpha$  型半水石膏および  $\beta$  型半水石膏である。

これらの諸性状については石膏石灰ハンドブック (1972) およびコンクリート便覧 (1976) に参考となるものもあるが, 低温に対する性能および構造材料としての詳細は不備で, 研究の基礎データとするのには十分でない。

一般に石膏は, コンクリートに比べて

- 1) 比重が小さい。
- 2) 比強度 (強度/比重) が大きい。
- 3) 硬化時間が早く, かつ硬化に伴う収縮量が少ない。
- 4) 強度は混和剤によってかなりの幅で調節が可能である。
- 5) 耐火性に優れている。

等の利点をもっている。反面短所としては

- 1) 吸水性が大きい。
- 2) クリープ変形が大きい。
- 3) 通常弱酸性である (ただし, これは添加剤によって弱アルカリ性に変えることができる)。
- 4) 付着強度が小さい。

等があげられる。これらの短所を化学的に改良し, あるいは複合材料として, それぞれの特性を活かす研究も岸谷・平居 (1977a, b, c, d, e, f, g, h, i, 1978a, b) によって行われている。

本報告は、7 章から構成され、第 2 章で、石膏の昭和基地における材料学的特性を得るため、通常入手できるいくつかの石膏に関する一般的性質を調べ、特に養生温度を昭和基地作業時の平均気温 ( $0^{\circ}\text{C}$ ) と冬期平均気温 ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) とし、これと比較するため、標準養生温度 ( $+20^{\circ}\text{C}$ ) と、あわせて 3 種類の温度パラメーターを設け、単体および複合材料の基礎的諸強度および諸係数を得るために行った試験について述べた。

第 3 章では、2 章の結果に基づき、II 型無水石膏改良品をマトリックスとする各種鉄筋補強石膏部材を試験体とする強度試験の概要と、その記号について述べた。

第 4 章では次の 5, 6, 7 章で行う実験の解析についての記号と仮定および計算式について述べてある。

第 5 章以下 6, 7 章では、鉄筋補強石膏部材としての梁、柱およびラーメンの力学的特性を究明するため、実大あるいは実大の  $1/2$  程度の試験体で強度試験を行い、これとあわせて各々の石膏部材と同一形状の鉄筋コンクリート部材で強度試験を行い、それらの試験結果および計算結果を比較検討し、鉄筋補強石膏部材の、構造部材としての可能性について考究した。

なお、この実験を通じて行った第 2 章の試験のうち、低温特性を得るものに関しては、低温室であらかじめ  $0^{\circ}\text{C}$  近くまで冷却した石膏、セメントおよび骨材を、同温度の低温室内で練り混ぜ、試験体を作り、48 時間後脱型、所定の温度で養生した。試験は試験機の関係からその試験体を試験の直前に低温室より取り出し、常温試験室の中で、速やかに行った試験により得られた数値を、低温における実験値とした。

また、第 5 章以下構造部材の実験で、低温特性に関するものは、モデル化したミニ梁の実験を先に述べた第 2 章と同様の方法で養生、試験を行い、第 2 章の試験結果とあわせて大型構造部材の低温特性を推察した。

本報告において使用した用語のうち、特に説明を必要とするものを以下にあげる。

- 1) 石膏コンクリート：水和硬化性の石膏と水および骨材を主要材料とし、これらを練り混ぜて固めたもの。
- 2) 軽量石膏：石膏をマトリックスとする複合材料のうち、人工軽量骨材（商品名、メサライト細骨材、メサライト粗骨材）を用いた軽量石膏コンクリート。
- 3) 鉄筋補強石膏単体梁：石膏単体（ペースト）を鉄筋で補強した梁で、本文では特に必要なもの以外石膏単体梁と呼ぶ。
- 4) 鉄筋補強軽量石膏部材：II 型無水石膏改良品をマトリックスとして、軽量骨材との複合材料を、さらに鉄筋で補強した構造部材で、特に必要のあるものを除いて、石膏部材と呼

ぶ。なお、この石膏部材の梁、柱およびラーメンを石膏梁、石膏柱および石膏ラーメンと呼ぶ。

## 2. 石膏の一般的性質

### 2.1. 概 要

南極昭和基地で使用する構造材料の選定について、各種石膏コンクリートの養生条件を低温域まで広げてそれらの基礎的諸強度および諸係数を得る目的で、養生温度をパラメーターとして次の実験を行った。

圧縮強度試験、引張強度試験、剪断強度試験、弾性係数およびポアソン比試験、および付着強度試験。

これらの実験については、すでに岸谷・平居 (1972) 等によって報告がなされているが、低温養生をパラメーターとした報告は皆無である。

また、最初に述べたように、石膏は一般に付着強度が低く、すでに佐藤他 (1975 a, b, c, 1976, 1977 a, b, 1978, 1979 a, b, c), 岸谷・平居 (1977 a, b, c, d, e, f, g, h, i, 1978 a, b) 等によっても指摘され、石膏を構造体として使用する場合の大きな問題点の1つとされている。

これは石膏がセメントと異なり、表面のなめらかなものとの付着が著しく低く、当然鉄筋との付着もコンクリートに比べ、低下するものと考えられる。

これらの理由から、付着強度に関する試験では、石膏単体および複合材料（軽量石膏）に丸鋼と異形鉄筋を用いた試験を行い、コンクリートと比較した。

### 2.2. 試験概要

#### (1) 使用材料

本試験は次に示す石膏およびセメントを使用した。

II 型無水石膏単味品, II 型無水石膏改良品,  $\alpha$  型半水石膏 (硬石膏), および普通ポルトランドセメント。

#### (2) 供試体の作り方と供試体寸法

石膏についての試験方法は JIS に規定がないため、コンクリートの JIS 規格に従った。

供試体の作り方 JIS A1132

圧縮強度試験 JIS A1108,  $\phi 5 \times 10$  cm,  $\phi 10 \times 20$  cm

引張強度試験 JIS A1113,  $\phi 5 \times 10$  cm,  $\phi 10 \times 20$  cm

剪断強度試験 (JIS 規格がないため、逆対称荷重とした。)  $4 \times 4 \times 16$  cm

弾性係数試験  $\phi 10 \times 20$  cm

付着強度試験 ASTM C234,  $15 \times 15 \times 15$  cm

### (3) 調合および打設

調合は水石膏比をすべて 40% (W/G) とし凝結調整剤として, II 型無水石膏単味品には 1.5% (A/G) の凝結促進剤, II 型無水石膏改良品には 2.76% (A/G) の凝結促進剤,  $\alpha$  型半水石膏には 0.3% (A/G) の凝結遅延剤を用いた.

練り混ぜはモルタルハンドミキサー (回転数 120 回/分) を使用し, 約 3~5 分練り混ぜ後打設, 48 時間後脱型, 養生した. なお, 付着強度試験に関する調合は, 次の 2.3. 試験方法の (5) 付着強度試験で述べる.

### (4) 養生条件

次の 3 種類の温度で養生した.

常温 (+20°C): 恒温室使用, 湿度 78%

低温 ( $\pm 0^\circ\text{C}$ ): 市販冷蔵庫使用, 測定温度 +4°C

低温 (-20°C): 大型冷凍庫使用

## 2.3. 試験方法

### (1) 圧縮強度試験

試験体の加力面は平滑に仕上げ, 単軸圧縮を 20 ton アムスラーを 10 ton セットで行い, 載荷速度は  $5 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s}$  とした.

### (2) 引張強度試験

この試験は純引張試験でなく, 割裂 (または圧裂) による引張試験方法で, 供試体を横にして加力板に直接接触させる方法で行い, 引張強度は次式によった.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (2.1)$$

ここに,

$\sigma_t$ : 引張強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )

$P$ : 最大荷重 (kg)

$d$ : 供試体の直径 (cm)

$l$ : 供試体の長さ (cm)

加力は 20 ton アムスラーを 5 ton セットで, 載荷速度は  $5 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s}$  とした.

### (3) 剪断強度試験

逆対称荷重方式 (剪断スパン 1 cm) とし, 加力点は  $\phi 6$  mm の丸鋼を使用し, 図 2.1 のご

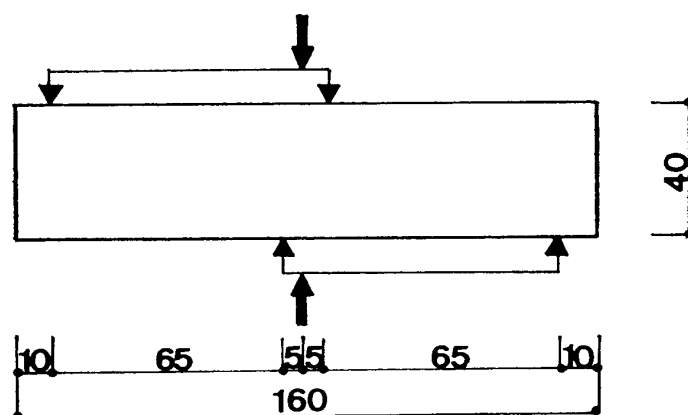


図 2.1 剪断試験体 (単位: mm)

Fig. 2.1. Details of specimen for shear test.

とく加力した。

#### (4) 弾性係数およびポアソン比試験

60 mm のストレインゲージを試験体中央に縦に設け縦歪度 ( $\epsilon_c$ ) を測定し、その応力-歪曲線を描き、この曲線上の  $1/3 F_c$  の点と原点を結ぶ直線の方角係数をもって弾性係数  $E_{1/3}$  を求めた。また、同時にこれと直角方向のストレインゲージにより横歪度 ( $\epsilon_d$ ) を測定しポアソン比  $\nu(\epsilon_d/\epsilon_c)$  を求めた。なお、歪度はそれぞれ供試体の両側 2 個所で測定して、その平均値をとった。

この試験に用いた石膏は II 型無水石膏改良品のみである。

#### (5) 付着強度試験

II 型無水石膏改良品を用い、石膏単体、軽量石膏およびコンクリートに対する丸鋼と異形鉄筋の縦打、横打の付着力を調べることを目的とした。

試験体の形状および寸法を図 2.2 に、試験方法および測定方法を図 2.3 に、使用材料および調合設計を表 2.1 に示す。

加力は、100 ton アムスラーを 10 ton セットで荷重速度は 600 kg/分 前後とした。なお、自由端の変位の測定はダイヤルゲージ (1/1000 mm) を用いた。

試験体の製作は鉄筋を縦および横方向に挿入、 $\phi 6$  mm のスパイラル筋を図 2.2 のごとく設けて打設し、同一試料から  $\phi 10 \times 20$  cm のシリンダー供試体を作り、圧縮強度および弾性係数、ポアソン比も調べた。

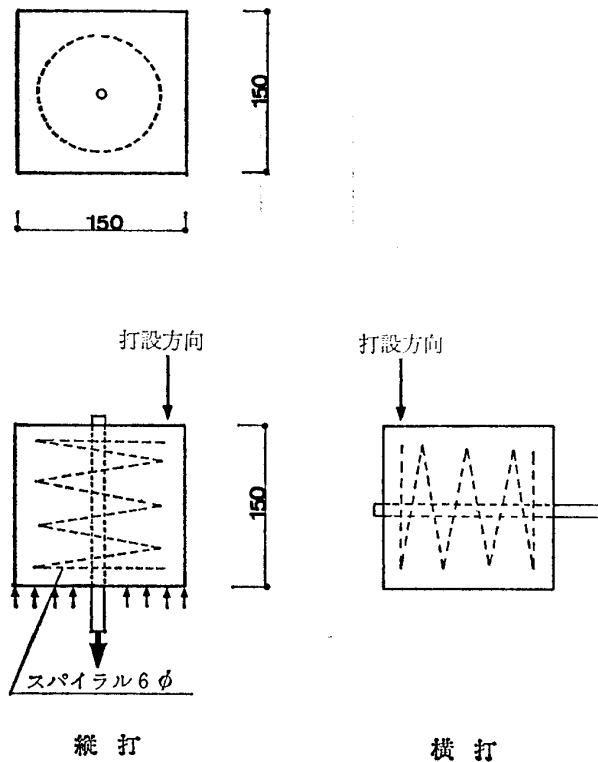


図 2.2 付着試験体 (単位: mm)

Fig. 2.2. Details of specimen for bond test.

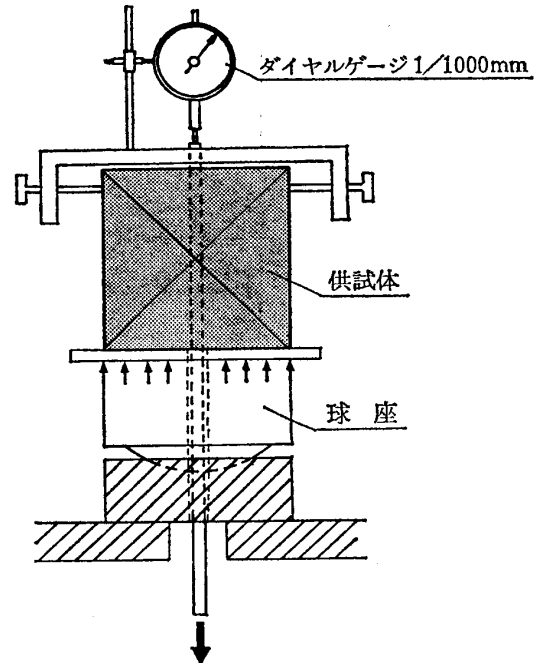


図 2.3 付着試験方法

Fig. 2.3. Setup of bond test.

表 2.1 使用材料および調合設計

Table 2.1. Materials and mixture proportions.

石膏単体	石膏 水石膏比 凝結調整剤	II型無水石膏改良品 (G) 40°/wt 2.76% (A/G)
コンクリート	セメント 骨材 調合	普通ポルトランドセメント (C) 川砂 (S), 川砂利 (G') C:W:S:G' (1:0.65:3.07:3.22)
軽量石膏	石膏 水石膏比 軽量骨材 凝結調整剤 調合	II型無水石膏改良品 (G) 40°/wt メサライト細骨材 (MS) 5 mm 以下 メサライト粗骨材 (MG') 25 mm 以下 2.76% (A/G) G:W:MS:MG' (1:0.77:0.71:1.41)
鉄筋	丸異 鋼形	SR24 13φ SD30 D 13



## 2.4. 試験結果

試験結果を次に示す. すべての数値は同一の試験に 3 本の供試体を用いて行ったものの平均値である.

### 1) 圧縮, 引張および剪断強度

養生温度 (+20°C, 0°C, -20°C) を変化させ, 1, 3, 7, 28 日材令における強度試験を行った. 各試験結果を表 2.2 に示す.

### 2) 弾性係数およびポアソン比

II 型無水石膏改良品についてのみ試験を行い, その結果を表 2.3 に示す.

### 3) 付着強度試験

常温養生 (+20°C) では石膏単体とコンクリート, 低温養生 (-20°C) では石膏単体と軽量石膏で試験を行った. その結果を表 2.4 に示す.

表 2.2 石膏の諸強度 (単位, kg/cm<sup>2</sup>)

Table 2.2. Material strength of gypsum specimens cured under various temperatures (compressive, tensile, and shear).

養生温度 (°C)	材令 (日)	II 型無水石膏 (単味)			II 型無水石膏改良品			α 型 半 水 石 膏		
		圧縮	引張	剪断	圧縮	引張	剪断	圧縮	引張	剪断
+20	1	186	23	31	114	12	19	175	20	34
	3	174	19	34	175	19	27	164	19	31
	7	206	21	39	192	19	33	200	17	35
	28	316	22	40	252	31	40	210	29	46
0	1	150	22	34	100	12	20	151	21	40
	3	172	24	36	123	12	25	142	21	36
	7	184	25	30	153	14	27	167	20	40
	28	240	29	38	229	20	32	185	30	43
-20	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	3	324	39	55	105	10	37	367	67	81
	7	326	45	64	246	34	47	276	43	56
	28	360	49	68	324	39	52	321	43	62

表 2.3 石膏の弾性係数およびポアソン比  
Table 2.3. Elastic modulus and Poisson's ratio of gypsum.

養生温度 (°C)	+20	0	-20
弾性係数 $E_{1/3} (\times 10^5 \text{ kg/cm}^2)$	1.06	1.01	1.13
ポアソン比 ( $\nu$ )	0.22	0.22	0.22

表 2.4 付着強度 (材令 28 日)  
Table 2.4. Results of bond test.

養生	試験体	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	打ち込み 方向	鉄筋	付着強度 (kg/cm <sup>2</sup> )		〔B〕/〔A〕
					自由端すべり 0.025mm 時 〔A〕	最大荷重時 〔B〕	
常 温 +20°C	石膏単体	312	横 打	13 φ	6.1	10.1	1.66
				D13	°15.7	64.2	4.09
			縦 打	13 φ	13.0	18.3	1.41
				D13	*33.0	70.7	2.14
養 生	コンクリート	381	横 打	13 φ	25.0	27.0	1.08
				D13	52.0	105.0	2.02
			縦 打	13 φ	46.0	56.0	1.22
				D13	°60.0	115.0	1.92
低 温 -20°C	石膏単体	187	横 打	13 φ	4.6	6.5	1.40
				D13	20.7	77.5	2.90
			縦 打	13 φ	8.5	18.8	2.21
				D13	50.0	80.0	1.60
養 生	軽量石膏	180	横 打	13 φ	13.0	21.9	1.68
				D13	55.6	86.7	1.56
			縦 打	13 φ	23.2	42.3	1.82
				D13	74.2	92.5	1.25

° 印は石膏またはコンクリートの割裂破壊。\* 印は鉄筋降伏

## 2.5. 考 察

### (1) 圧縮, 引張, 剪断強度と弾性係数

各種の養生温度における特性をそれぞれの石膏について調べ, 諸強度および諸係数を検討した。

最初に材令と圧縮強度 (図 2.4), 引張強度 (図 2.5) および剪断強度 (図 2.6) の関係と比較し, 図 2.7 に, 養生温度をパラメーターとする 4 週の諸強度との比較を材料ごとに行い, 図 2.8 には II 型無水石膏改良品の各養生温度における圧縮応力度-歪曲線を, コンクリートのそれと比較して示した。

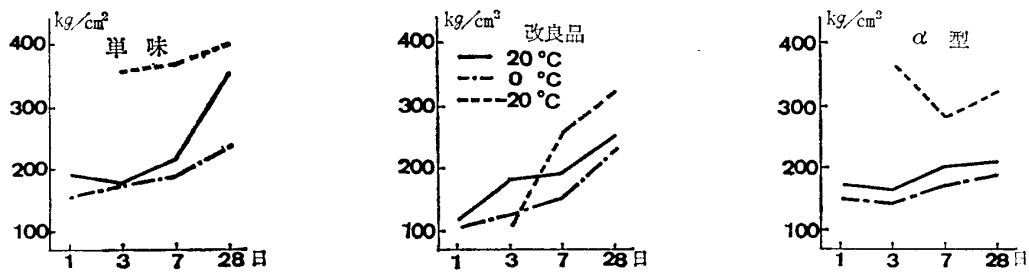


図 2.4 石膏の圧縮強度と材令

Fig. 2.4. Relation between compressive strength of gypsum and material age (days).

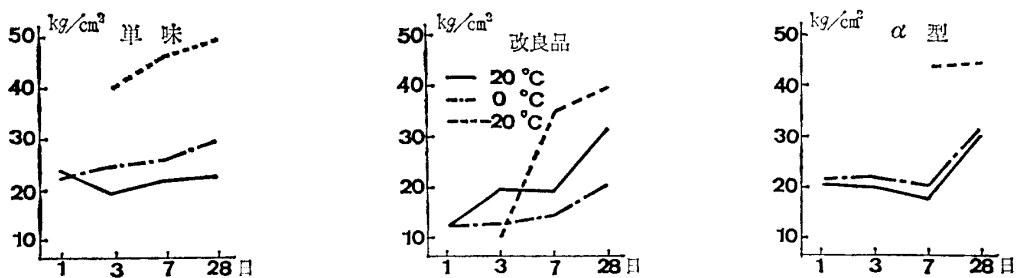


図 2.5 石膏の引張強度と材令

Fig. 2.5. Relation between tensile strength of gypsum and material age (days).

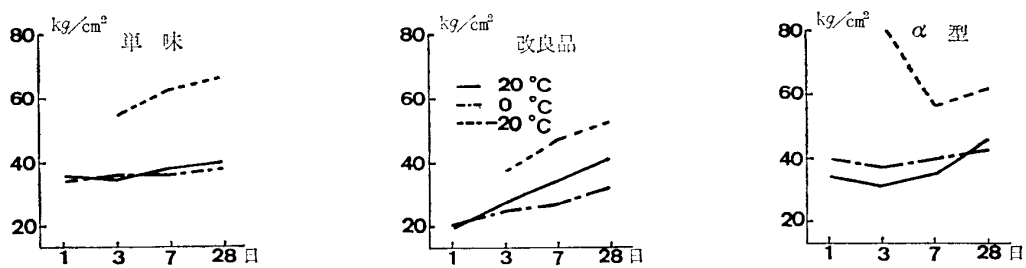


図 2.6 石膏の剪断強度と材令

Fig. 2.6. Relation between shear strength of gypsum and material age (days).

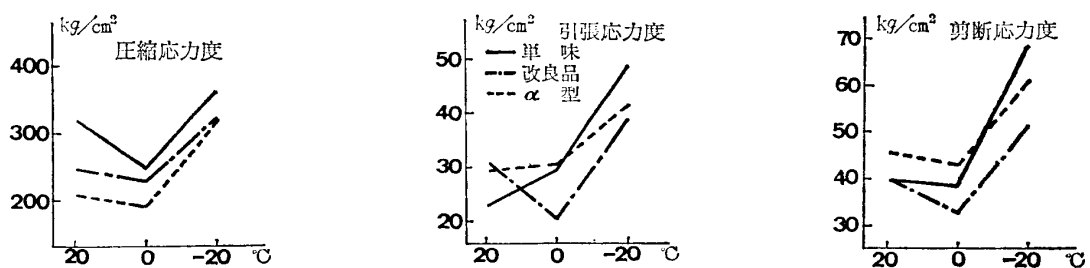


図 2.7 4 週における温度変化と諸強度

Fig. 2.7. Relation between curing temperature variations and strength (compressive, tensile, and shear) after four weeks.

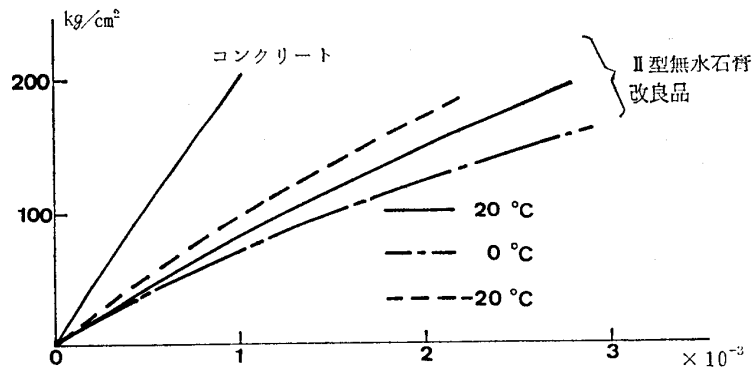


図 2.8 応力-歪曲線  
Fig. 2.8. Stress-strain curves.

一般に温度に対する諸強度の特性は、 $0^{\circ}\text{C}$  において若干低下するが、 $-20^{\circ}\text{C}$  になると常温養生 ( $+20^{\circ}\text{C}$ ) の 50~100% 位増加する。

一方Ⅱ型無水石膏改良品の弾性係数はコンクリートに比べて低く、 $-20^{\circ}\text{C}$ 、 $+20^{\circ}\text{C}$ 、 $0^{\circ}\text{C}$  の順で低く、先の4週強度の性状と同じようになる。

### (2) 鉄筋と石膏およびコンクリートとの付着強度

石膏は表面の滑らかなものとの付着が悪く、鉄筋もその例外ではない、図 2.9 は石膏単体およびコンクリートと、鉄筋の付着強度を比較したものである。石膏単体と鉄筋の付着力は、コンクリートのそれに比べ、丸鋼、異形鉄筋を問わずそれぞれ約 1/2~1/3 である。

また、表 2.4 に常温養生の石膏単体およびコンクリートの (最大荷重時の付着強度)/(自由端のすべりが 0.025 mm 時の付着強度) を示す。石膏、コンクリートとも丸鋼の値は異形鉄筋の 45~63% とかなり低い値である。

以上のことから、丸鋼に対する石膏単体の付着力はコンクリートと異なり、ペーストの粘着力によるもので、すべり摩擦力は小さいと考えられる。異形鉄筋については、ほとんど鉄筋の形状 (リブ) による石膏の剪断抵抗が付着力を増大させたものと思われる。

### (3) 鉄筋の打ち込み方向の違いによる付着強度

図 2.9 より、石膏単体の横打は縦打に比べて 50% 前後の付着強度の低下が見られる。これは石膏の沈降とブリージングによる鉄筋下面の水膜や空隙およびその部分の石膏自身の強度の低下のためと考えられる。また、コンクリートにおいても 40% 前後の付着強度の低下が見られる。

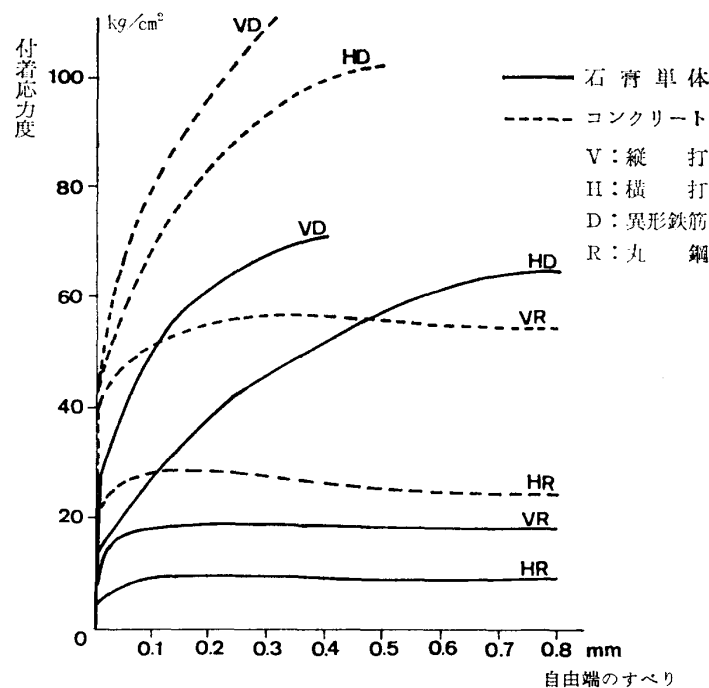


図 2.9 石膏単体およびコンクリートの付着強度 (常温養生 20°C)

Fig. 2.9. Bond stress-slip curves of gypsum and concrete cured under temperature of 20°C.

#### (4) 軽量石膏の付着強度

図 2.10 より、石膏に軽量骨材を加え複合材料とした場合 (表 2.1), 付着強度は丸鋼, 異形鉄筋とも石膏単体のものよりかなり増加することがわかる. 軽量石膏と石膏単体との付着強度を比べると, 丸鋼は 3.3 倍, 異形鉄筋は 1.8 倍となる (表 2.4).

なお, 軽量石膏の付着強度は, コンクリートの値と近似し, II 型無水石膏改良品に軽量骨材を使用して複合材料とすると, 付着力を高めるのに, より有効であると推察される.

#### (5) 養生温度の変化による付着強度

常温養生時と低温養生時における付着強度と変位の関係を図 2.11 に示す. 図から自由端のすべりが 0.025 mm 付近では, 低温養生の付着力が大きな値を示すが, 変位の増大に伴い, その傾斜は急速に緩やかになり, 0.18 mm 付近で常温養生の付着応力度-変位曲線と交差する. これは, 低温養生が, 常温養生に比べ初期の付着力が大きく, 摩擦力が小さいのではないと思われる.

#### (6) 石膏の付着応力度試験値に対するコンクリートの許容付着応力度の比較

図 2.12 は石膏の付着試験結果を, コンクリートの許容付着応力度と比較したものであり, 試験値に対する比を安全率  $\nu$  とした.

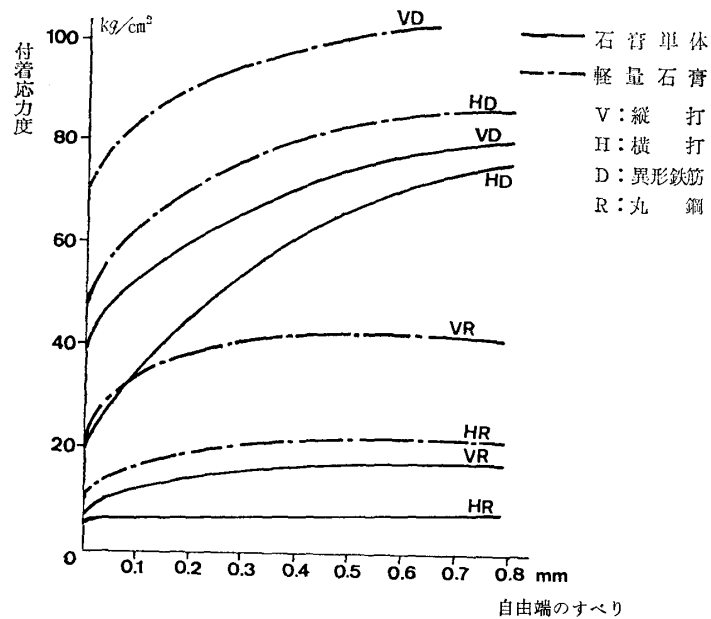


図 2.10 石膏単体および軽量石膏の付着強度 (低温養生  $-20^{\circ}\text{C}$ )  
 Fig. 2.10. Bond stress-slip curves of gypsum and lightweight gypsum cured under temperature of  $-20^{\circ}\text{C}$ .

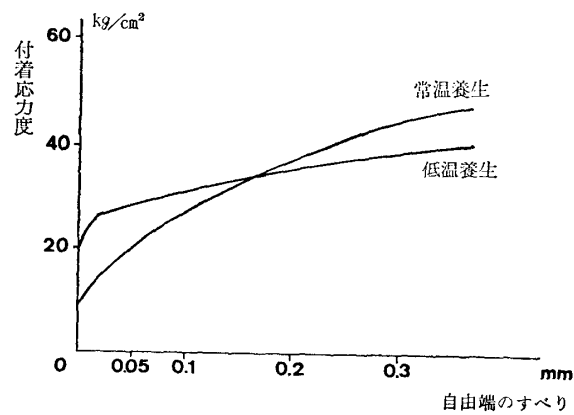


図 2.11 常温養生と低温養生の付着強度 (石膏単体, 異形鉄筋, 横打)  
 Fig. 2.11. Bond stress-slip curves of gypsum cured under normal and low temperatures (specimens of gypsum only, deformed reinforcing bars, and lateral casting).

異形鉄筋の自由端のすべりが  $0.025\text{ mm}$  時の安全率は, 軽量石膏が 1.7, 石膏単体は 0.9 で, 現行規準に対し, 軽量石膏は満足するものの, 石膏単体のそれはわずかに不足し, 満足するものとはいえない。

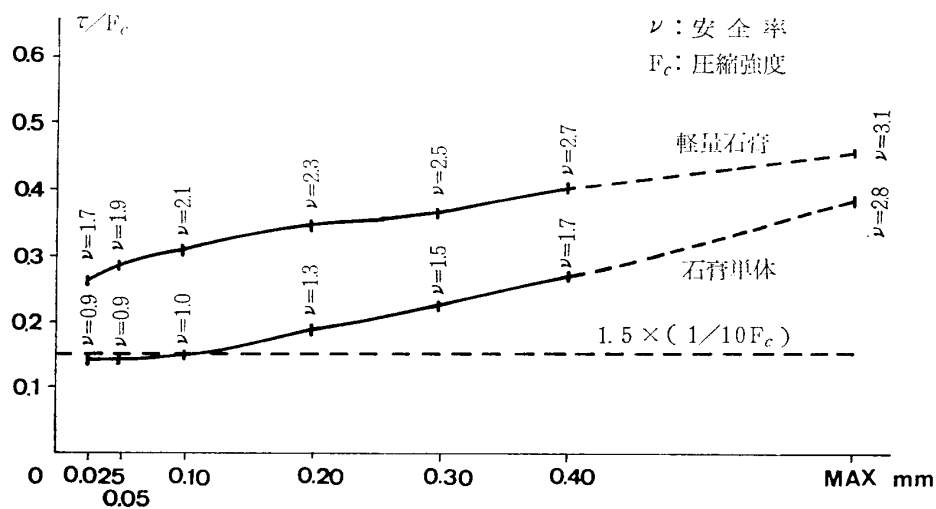


図 2.12 異形鉄筋の石膏付着応力度試験値のコンクリート許容付着応力度に対する値  
 Fig. 2.12. The relation between the safety factors of gypsum's bond unit stress, as compared with existing Building Standard Act in Japan on concrete, and the slidden displacement of reinforcing bars.

## 2.6. 結 び

各種石膏の諸強度について、その実験結果から、すべての石膏がおおむね満足する結果を得、特に低温に対して良い特性を得ることができた。

しかし、構造材料としては強度以外に安定性や施工性の問題があり、これらの事柄を考慮して、II型無水石膏改良品が最もその性能に優れているものと思われる。なお、安定性に関しては、岸谷・平居 (1977 a, b, c, d, e, f, g, h, i, 1978 a, b) によって満足すべき結果が報告されている。

また、II型無水石膏改良品は、石膏単体として使用するより、軽量骨材との複合材料（軽量石膏）として使用するときに、その性能を改善し、より良い結果を得ることができた。

## 3. 強度試験の概要と試験体記号

### 3.1. 概 要

強度試験は、梁、柱およびラーメンの石膏構造体の、実大あるいは、実大の 1/2 の試験体を製作し、多数回繰返し載荷実験を行い、その構造特性を検討することを目的とした。

それぞれの試験体は、前章の試験結果から II 型無水石膏改良品を用い、この石膏をマトリックスとする 軽量骨材との複合材料を、さらに鉄筋で補強し、鉄筋補強軽量石膏部材と

した。

実験に用いた石膏梁，石膏柱，および石膏ラーメンは同一の鉄筋コンクリート部材（以下 RC 部材と呼ぶ）と比較するため，各部材ごとに同種の RC 試験体を製作し，同一の実験を行い，それらの諸強度，変形および破壊性状等を比較検討した。なお，RC 部材の試験体製作に用いたコンクリートは，普通ポルトランドセメントの R.M.C. である。

各種試験体の製作は，それぞれの実験概要に示した調合計画により製作し，同時に，同一試料から採取したシリンダー供試体をその試験体と材令および養生条件を等しくし，第 2 章石膏の一般的性質で述べた方法により試験を行い，使用材料の諸性能を測定した。

なお，試験体の製作および諸試験は，日本大学理工学部習志野校舎および同・大型構造物試験棟で行った。

### 3.2. 試験体の記号

実験に用いた試験体には，次の記号を用いた。実験の種類を表す記号を最初に，B：梁，C：柱，F：ラーメンの 3 文字で表し，次に石膏とコンクリートの種別をそれぞれ G および C とし，3 桁目に骨材の種類を M：軽量骨材，O：川砂利，川砂，—：単体の 3 文字で，4 桁目に使用鉄筋による種別を R：丸鋼，D：異形鉄筋とした。通常は以上の 4 文字で試験体の種類を表し，5 桁目以下必要に応じて各種実験のための主要因を，それが軸力ならば  $N$ ，帯筋比ならば  $P_w$  等で表し，最後に同一試験体の番号を（ ）をつけて区別した（表 3.1）。

表 3.1 試験体記号  
Table 3.1. Identification of specimens.

桁	数	1	2	3	4	5	6
解	説	実験種別	主 材	骨 材	鉄 筋	主要因	試験体番号
記	号	B, C, F	G, C	M, O, —	R, D		( )
	B: 梁	G: 石膏	M: 軽量骨材	R: 丸鋼			
	C: 柱	C: コンクリート	O: 川砂・川砂利	D: 異形鉄筋			
	F: ラーメン		—: 単体				



## 4. 解析の仮定と計算式

### 4.1. 概 要

5, 6, 7 章に記す梁, 柱およびラーメンの解析に, 各章で共通して用いる記号, 材料の性状および計算仮定について, ここで簡単な解説を行い, あわせて既往の計算式および理論式を記す.

なお, 個々についてのみ用いる解析方法および計算式は, その都度示す.

#### 4.1.1. 記号

- $A$ : 石膏およびコンクリート部材の断面積
- $A_e$ : 石膏およびコンクリート部材の等価断面積
- $A_i$ :  $P-\delta$  曲線によって描かれるループ面積
- $a_c$ : 圧縮鉄筋の断面積
- $a_t$ : 引張鉄筋の断面積
- $a_w$ : 1 組のあばら筋または帯筋の断面積
- $b$ : 長方形梁または柱の幅
- ${}_cC_c$ : 石膏またはコンクリートの圧縮合力
- ${}_sC_c$ : 圧縮鉄筋の圧縮合力
- $C_R$ : 共振容量
- $D$ : 曲げ材の全せい
- $d$ : 曲げ材の圧縮縁から引張鉄筋重心までの距離
- $d_c$ : 曲げ材の圧縮縁から圧縮鉄筋重心までの距離
- $d_{c1}$ :  $d_c/d$
- $d_t$ : 曲げ材の引張縁から引張鉄筋重心までの距離
- $d_{t1}$ :  $d_t/d$
- $E_c$ : コンクリートの弾性係数
- $E_s$ : 鉄筋の弾性係数
- $e$ : 偏心距離
- $F_c$ : コンクリートの設計基準強度
- $f_t$ : 鉄筋の許容引張応力度
- $g$ : 等価断面の重心と断面の最大圧縮応力度をうける縁との距離

$g_1$ :  $g/D$

$h_{eq}$ : 等価粘性減衰定数

$I$ : 断面 2 次モーメント

$I_e$ : 中立軸に関する有効等価断面 2 次モーメント

$i$ : 断面 2 次半径

$j$ : 応力中心距離

$k_c, k_u$ : 寸度効果についての修正係数

$k_e$ : 弾性剛性時の剛比

$k_P$ : 軸筋量についての修正係数

$l_k$ : 主筋の座屈長さ

$M_{BC}$ : 曲げ亀裂モーメント

$M_{BSC}$ : 曲げ剪断亀裂モーメント

$M_y$ : 曲げ降伏モーメント

$M_u$ : 曲げ終局モーメント

$N$ : 柱の軸方向力

$n$ :  $E_s/E_c$  ヤング係数比

$P_c$ :  $a_c/b \cdot D$  長方形柱の圧縮鉄筋比

$P_c$ :  $a_c/b \cdot d$  長方形梁の圧縮鉄筋比

$P_g$ : 主筋全断面積/コンクリート全断面積

$P_t$ :  $a_t/b \cdot D$  長方形柱の引張鉄筋比

$P_t$ :  $a_t/b \cdot d$  長方形梁の引張鉄筋比

$P_w$ :  $a_w/b \cdot x$  あばら筋比または帯筋比

$Q_{sc}$ : 剪断亀裂荷重

$Q_{su}$ : 剪断終局荷重

${}_cT_t$ : 石膏またはコンクリートの引張合力

${}_sT_t$ : 鉄筋の引張合力

$x_n$ : 圧縮縁から中立軸までの距離

$x_{n1}$ :  $x_n/D$

$Z_e$ : 鉄筋を考慮した断面係数

${}_c\varepsilon$ : 石膏またはコンクリートの圧縮歪度

${}_c\varepsilon_B$ : 石膏またはコンクリートの最大応力度時における歪度

${}_c\varepsilon_c$ : 石膏またはコンクリートの破壊歪度

${}_s\varepsilon_c$ : 鉄筋の圧縮歪度

${}_s\varepsilon_t$ : 鉄筋の引張歪度

$\alpha_y, \alpha_u$ : 塑性係数

$\alpha_i$ : 剛性低下率

$\sigma_0$ : 石膏またはコンクリートの単位軸方向力

${}_c\sigma$ : 石膏またはコンクリートの圧縮応力度

${}_c\sigma_B$ : 石膏またはコンクリートの最大応力度

${}_c\sigma_t$ : 石膏またはコンクリートの引張応力度

${}_s\sigma_c$ : 鉄筋の圧縮応力度

${}_s\sigma_t$ : 鉄筋の引張応力度

${}_s\sigma_y$ : 鉄筋の降伏応力度

${}_w\sigma_y$ : あばら筋または帯筋の降伏応力度

$\gamma$ :  $a_c/a_t$  複筋比

$\lambda$ :  $l_k/i$  細長比

$\phi$ : 鉄筋の直径または鉄筋を考慮した断面 2 次モーメント増大率

#### 4.1.2. 材料の性状および計算仮定

1) 平面保持の法則は成り立つものとする.

2) 鉄筋の歪が引張, 圧縮側ともに降伏歪 ( ${}_s\varepsilon_y$ ) に達するまでは完全弾性体とし,  ${}_s\varepsilon_y$  を超過した後は歪硬化を無視し, 完全塑性体とした (図 4.1). なお, バウシinger 効果は無視する.

3) 石膏 および コンクリートの応力-歪曲線は, 引張側は亀裂発生までは弾性体とし, 圧縮側コンクリートに関しては梅村の  $e$  関数と仮定した (図 4.2).

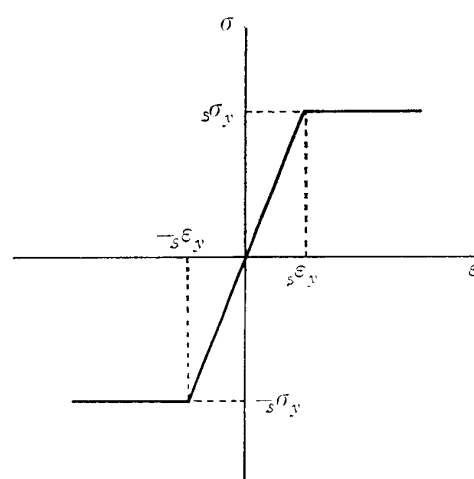


図 4.1 鉄筋の応力-歪曲線  
Fig. 4.1. Idealized stress-strain curve of reinforcing bar.

$${}_c\sigma = 6.75 \cdot {}_c\sigma_B (e^{-0.812{}_c\varepsilon/{}_c\varepsilon_B} - e^{-1.218{}_c\varepsilon/{}_c\varepsilon_B}) = f(\varepsilon). \quad (4.1)$$

なお, 石膏に関しては実験データが不足のため最大応力度に対する歪は 0.3%, 終局歪は

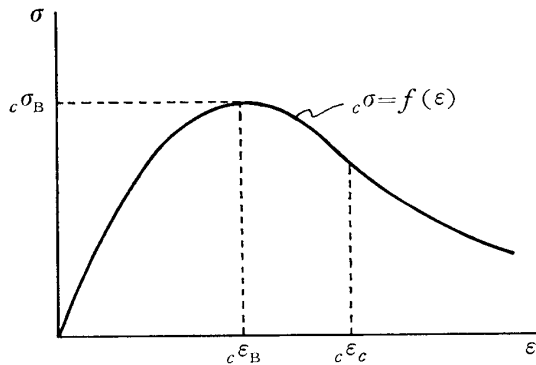


図 4.2 石膏およびコンクリートの応力-歪曲線  
Fig 4.2. Stress-strain curves of gypsum and concrete.

0.35% と仮定し、コンクリートと同じ式 (4.1) を用いた。また、梁、柱に関して、亀裂発生までは石膏およびコンクリートの引張側、圧縮側の抵抗を、ともに考慮するが、亀裂発生後は引張側抵抗を無視する。

4) 剪断変形は無視する。

#### 4.2. 計算式

諸荷重については次の既往の鉄筋コンクリート部材の略算式を用いた。

1) 曲げ亀裂荷重 ( $M_{BC}$ )

$$M_{BC} = Z_e \left( \sigma_t + \frac{N}{A_e} \right). \quad (4.2)$$

2) 曲げ剪断亀裂荷重 ( $Q_{BSC}$ ) (ソーゼン式)

$$Q_{BSC} = 0.265 b \cdot d \sqrt{F_c} + \frac{M_{BC}}{M/Q - d/2}. \quad (4.3)$$

3) 剪断亀裂荷重 ( $Q_{sc}$ ) (荒川式)

$$Q_{sc} = \left\{ \frac{0.065 k_c (500 + F_c)}{M/(Q \cdot d) + 1.7} \right\} b \cdot j. \quad (4.4)$$

4) 曲げ降伏荷重 ( $M_y$ )

引張鉄筋が引張降伏するときの荷重とし、 $e$  関数法による。

5) 曲げ終局荷重 ( $M_u$ )

$e$  関数法による。

6) 剪断終局荷重 ( $Q_{su}$ )

軸力 0 の場合

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.092 k_u \cdot k_p (180 + F_c)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} + 2.7 \sqrt{P_w \cdot s \sigma_y} \right\} b \cdot j, \quad (4.5)$$

軸力がある場合

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.115 k_u \cdot k_p (180 + F_c)}{M/(Q \cdot d) + 0.115} + 2.7 \sqrt{P_w \cdot s \sigma_y} + \frac{0.1N}{b \cdot D} \right\} b \cdot j. \quad (4.6)$$

### 4.3. $e$ 関数法

鉄筋コンクリート部材等の複合体を弾塑性解析する場合、 $e$  関数法は弾性域および塑性域を区別することなく、梁、柱の任意の歪が決まれば、その時の応力を求めることができる。そこで鉄筋に関しては、4.1.2. 仮定 2) の応力-歪関係を用い、石膏およびコンクリートに関しては式 (4.1) の  $e$  関数を用いて応力を求めることができる。

梁の曲げモーメントおよび歪、応力の関係を図 4.3 に示す。

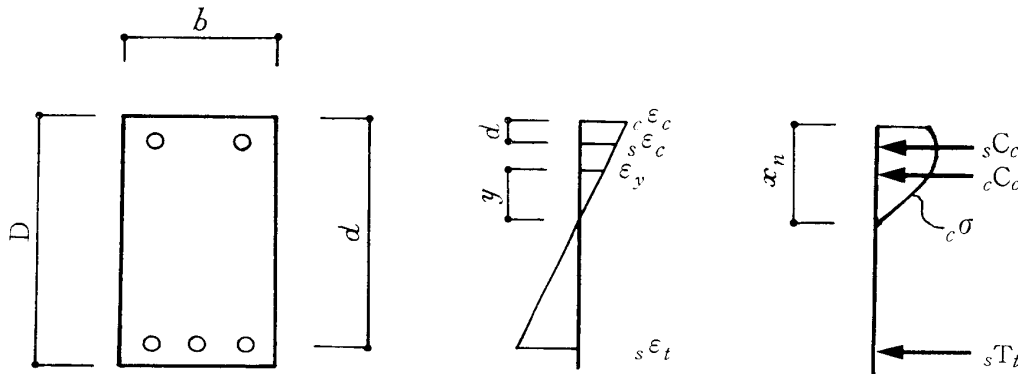


図 4.3 梁の変形に関する記号

Fig. 4.3. Definition of symbols concerning beam deformations.

軸方向力の釣り合いより

$$sT_t + cT_t = cC_c + sC_c, \quad (4.7)$$

ここに、石膏（およびコンクリート）の圧縮合力

$$cC_c = \int_0^{x_n} c\sigma \cdot b \cdot dy, \quad (4.7A)$$

$$\text{鉄筋の圧縮合力} \quad sC_c = a_c \cdot E_s \cdot s\varepsilon_c, \quad (4.7B)$$

$$\text{鉄筋の引張合力} \quad sT_t = a_t \cdot E_s \cdot s\varepsilon_t, \quad (4.7C)$$

石膏（およびコンクリート）の引張合力  $cT_t$  は 4.1.2. 仮定 3) より 0 とする。

式 (4.7) より中立軸距離  $x_n$  を求め、 $x_n$  が求まれば抵抗モーメントは次式により求まる。

$$M = {}_cM_c + {}_sM_c + {}_sM_t, \quad (4.8)$$

ここに,

$${}_cM_c = \int_0^{x_n} {}_c\sigma \cdot y \cdot b \cdot d_y, \quad (4.8A)$$

$${}_sM_c = a_c \cdot E_s \cdot {}_s\varepsilon_c (x_n - d_c), \quad (4.8B)$$

$${}_sM_t = a_t \cdot E_s \cdot {}_s\varepsilon_t (d - x_n). \quad (4.8C)$$

また、一定の軸方向力を受ける石膏柱（またはRC柱）が曲げモーメントを受けるとき、歪および応力状態を図4.4に示す。

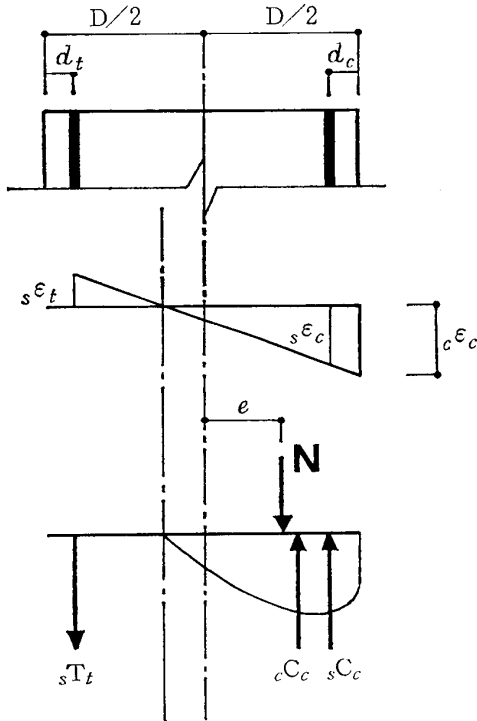


図 4.4 柱の変形に関する記号  
Fig. 4.4. Definition of symbols concerning column deformations.

軸方向力の釣合いより

$$N = {}_cC_c + {}_sC_c - {}_sT_t, \quad (4.9)$$

ここに,

$${}_cC_c: \text{式 (4.7A)}$$

$${}_sC_c: \text{式 (4.7B)}$$

$${}_sT_t: \text{式 (4.7C)}$$

中立軸に関するモーメントの釣合いより,

$$N \left( x_n - \frac{D}{2} + e \right) = {}_cM_c + {}_sM_c + {}_sM_t, \quad (4.10)$$

ここに,  ${}_cM_c$ : 式 (4.8A)

${}_sM_c$ : 式 (4.8B)

${}_sM_t$ : 式 (4.8C)

抵抗モーメント  $M$  は,

$$M = N \cdot e. \quad (4.11)$$

#### 4.4. 剛性に関する仮定

剛性については, 石膏およびコンクリート部材の引張側に亀裂が生じるまでは弾性剛性として取り扱い, 亀裂発生後の剛性低下は, 石膏およびコンクリートの引張強度を無視し,  $e$  関数法により降伏時と終局時における曲率と曲げモーメントを定めることにより求める. このとき曲率-曲げモーメントの関係を図 4.5 のごとく仮定する.

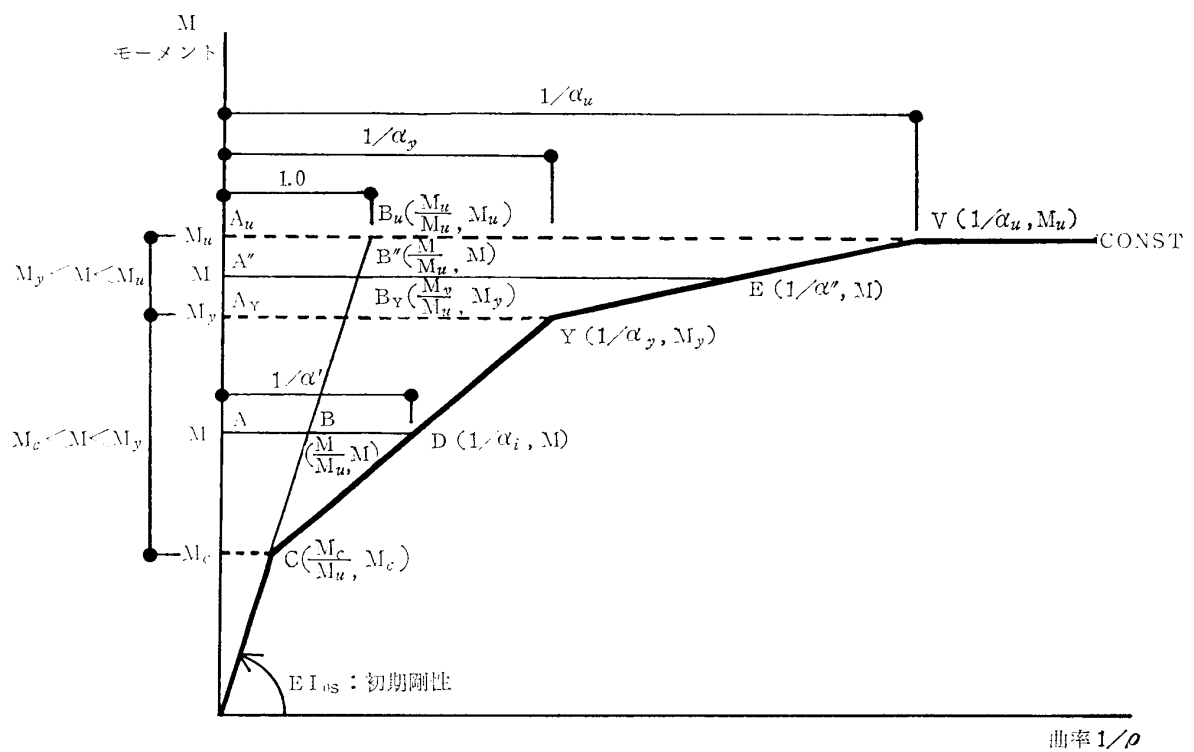


図 4.5 剛性  
Fig. 4.5. Stiffness.

ここで, 断面積は,

無筋の場合  $A = b \cdot D,$  (4.12)

有筋の場合  $A_e = A \{1 + n \cdot P_t (1 + \gamma)\}.$  (4.13)

断面 2 次モーメントは,

$$\text{無筋の場合} \quad I = \frac{b \cdot D^3}{12}. \quad (4.14)$$

$$\text{有筋の場合} \quad I_e = \phi \cdot I. \quad (4.15)$$

$$\text{ここに,} \quad \phi = 12 \left( \frac{1}{3} - g_1 + g_1^2 \right) + 12n \cdot P_t \{ (1 - g_1 - d_{t1})^2 + (g_1 - d_{c1})^2 \gamma \},$$

$$g = \frac{0.5 + n \cdot P_t (1 - d_{t1} + d_{c1} \cdot \gamma)}{1 + n \cdot P_t (1 + \gamma)}.$$

塑性係数  $\alpha_y, \alpha_u$

$$\alpha_y = \frac{E \cdot I_y}{E \cdot I_e}. \quad (4.16)$$

$$\alpha_u = \frac{E \cdot I_u}{E \cdot I_e}. \quad (4.17)$$

ここに,

$E \cdot I_e$ : 弾性剛性

$E \cdot I_y$ : 降伏時剛性

$E \cdot I_u$ : 終局時剛性

剛性低下の割合は, 弾性剛性の曲率を任意の曲げモーメントに対応する曲率の面積比とし, この剛性低下のパラメーターを剛性低下率 ( $\alpha_i$ ) とした.

この時の剛比  $k_e$  は,

$$k_e = k_i \cdot \alpha_i. \quad (4.18)$$

ここに,

$k_i$ : 弾性剛性時の剛比

次にあらゆる形の曲げモーメント分布に対応する曲率を図 4.6 (a)~(j) に示し, 剛性低下率 ( $\alpha_i$ ) についての式を次に示す. 式 (4.19)~(4.28) の付号 (a)~(j) は図 4.6 の付号に対応して書いたものである.

$$(a) \quad \alpha = \frac{(M_1 + M_2)(M_1 - M_2)}{M_1 M_c - M_2^2 + (1/\alpha')(M_1^2 - M_1 M_c)}. \quad (4.19)$$

$$(b) \quad \alpha = \frac{(M_1 + M_2)(M_1 - M_c)}{(1/\alpha') M_1 (M_1 + M_2 - 2M_c) + M_c (M_1 - M_2)}. \quad (4.20)$$

$$(c) \quad \alpha = \frac{M_1^2 + M_2^2}{M_1 M_c + M_2^2 + (1/\alpha') M_1 (M_1 - M_c)}. \quad (4.21)$$

$$(d) \quad \alpha = \frac{(M_1^2 + M_2^2)(M_1 - M_c)}{(M_1^2 + M_2^2)(M_1 - M_c) + M_1 (1/\alpha' - 1) \{ (M_1 - M_c)^2 + (M_2 - M_c)^2 \}}. \quad (4.22)$$



$$(e) \quad \alpha = \frac{(M_1 + M_2)(M_1 - M_2)}{M_y(M_1 - M_c)(1/\alpha_y) + M_1(M_1 - M_y)(1/\alpha'') + M_y M_c - M_2^2} \quad (4.23)$$

$$(f) \quad \alpha = \frac{(M_1 + M_2)(M_1 - M_2)}{[M_1^2 - M_2^2 + M_y(M_y - M_2)(1/\alpha_y - 1)\{(M_2 - M_c)/(M_y - M_c) + 1\} + \{M_y(1/\alpha_y - 1) + M_1(1/\alpha'' - 1)\}(M - M_y)]} \quad (4.24)$$

$$(g) \quad \alpha = \frac{M_1 + M_2}{M_2 + M_1(y_1 + y_2 + 1/\alpha'')} \quad (4.25)$$

ここに,

$$y_1 = \left( \frac{M_u}{M_1} h_1 - 1 \right) \frac{M_2 - M_c}{M_1 - M_c},$$

$$y_2 = \left( \frac{1}{\alpha''} - \frac{M_u}{M_1} h_1 \right) \frac{M_2 - M_y}{M_1 - M_y},$$

$$h_1 = \frac{M_1 - M_c}{M_y - M_c} \left( \frac{1}{\alpha_y} - \frac{M_c}{M_u} \right) + \frac{M_c}{M_u}.$$

$$(h) \quad \alpha = \frac{M_1^2 + M_2^2}{M_1^2 + M_2^2 + M_y(M_y - M_c)(1/\alpha_y - 1) + \{M_y(1/\alpha_y - 1) + M_1(1/\alpha'' - 1)\}(M_1 - M_y)} \quad (4.26)$$

$$(i) \quad \alpha = \frac{M_1^2 + M_2^2}{M_2^2 + M_y M_2 + M_1 y_3 (M_2 - M_c) + (M_1 - M_c) M_y (1/\alpha_y) + (M_1 - M_y) M_1 (1/\alpha'')} \quad (4.27)$$

ここに,

$$y_3 = \frac{M_y}{M_1} \left( \frac{1}{\alpha_y} - 1 \right) \frac{M_2 - M_c}{M_y - M_c}.$$

$$(j) \quad \alpha = \frac{M_1^2 + M_2^2}{2M_y M_c + M_1(M_2 - M_y)(y_4 + y_5) + M_y(M_1 + 2M_2 - 2M_c - M_y)(1/\alpha_y) + M_1(M_1 - M_y)(1/\alpha'')} \quad (4.28)$$

ここに,

$$y_4 = \left( \frac{1}{\alpha''} - \frac{M_u}{M_1} h_5 \right) \frac{M_2 - M_y}{M_1 - M_y},$$

$$y_5 = \left( \frac{M_u}{M_1} h_2 - 1 \right) \frac{M_2 - M_y}{M_1 - M_c},$$

$$h_2 = \frac{M_1 - M_c}{M_y - M_c} \left( \frac{1}{\alpha_y} - \frac{M_c}{M_1} \right) + \frac{M_c}{M_u}.$$

なお, 式 (4.19)~(4.28) 中の  $1/\alpha'$ ,  $1/\alpha''$  は,

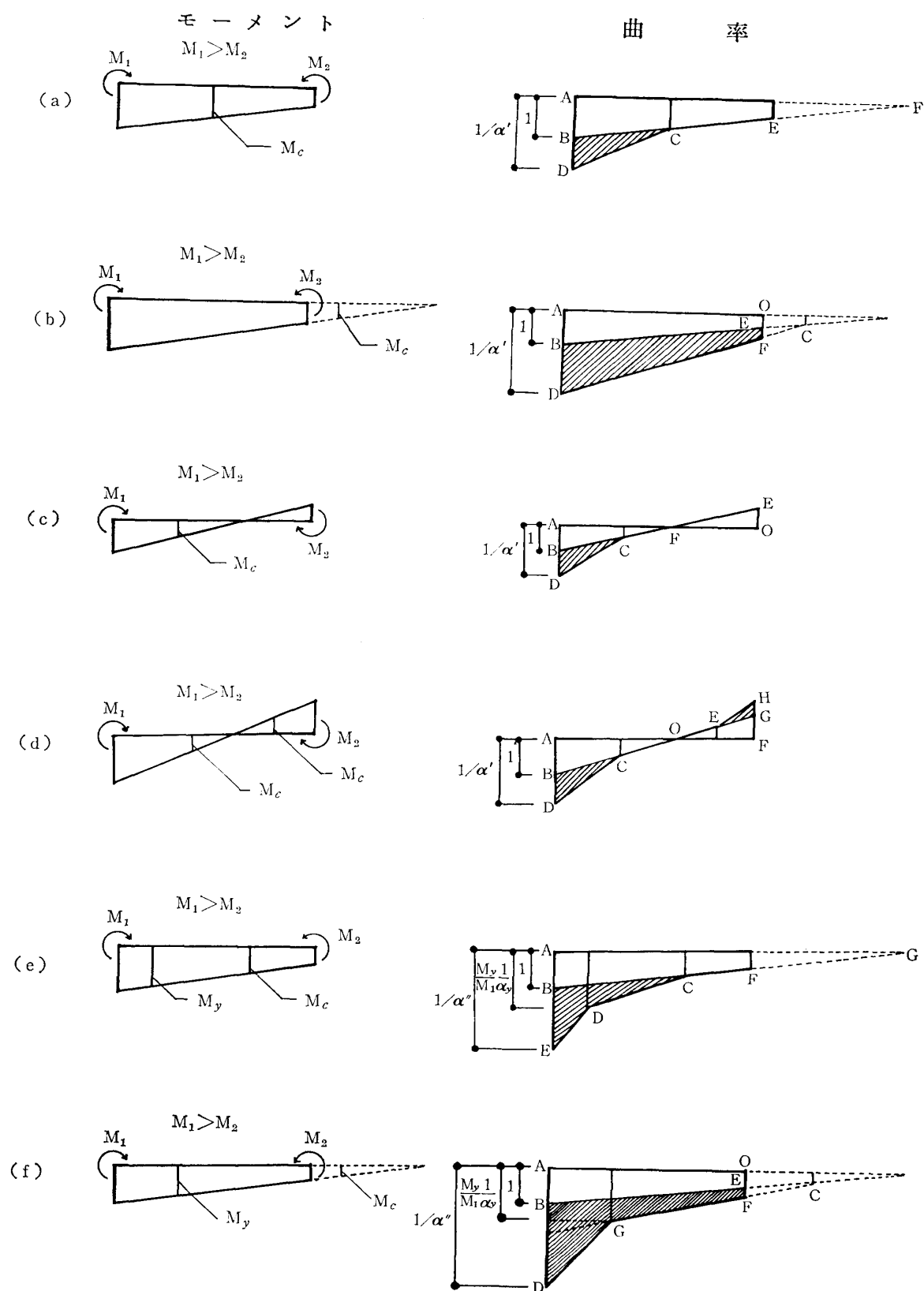


Fig. 4.6.

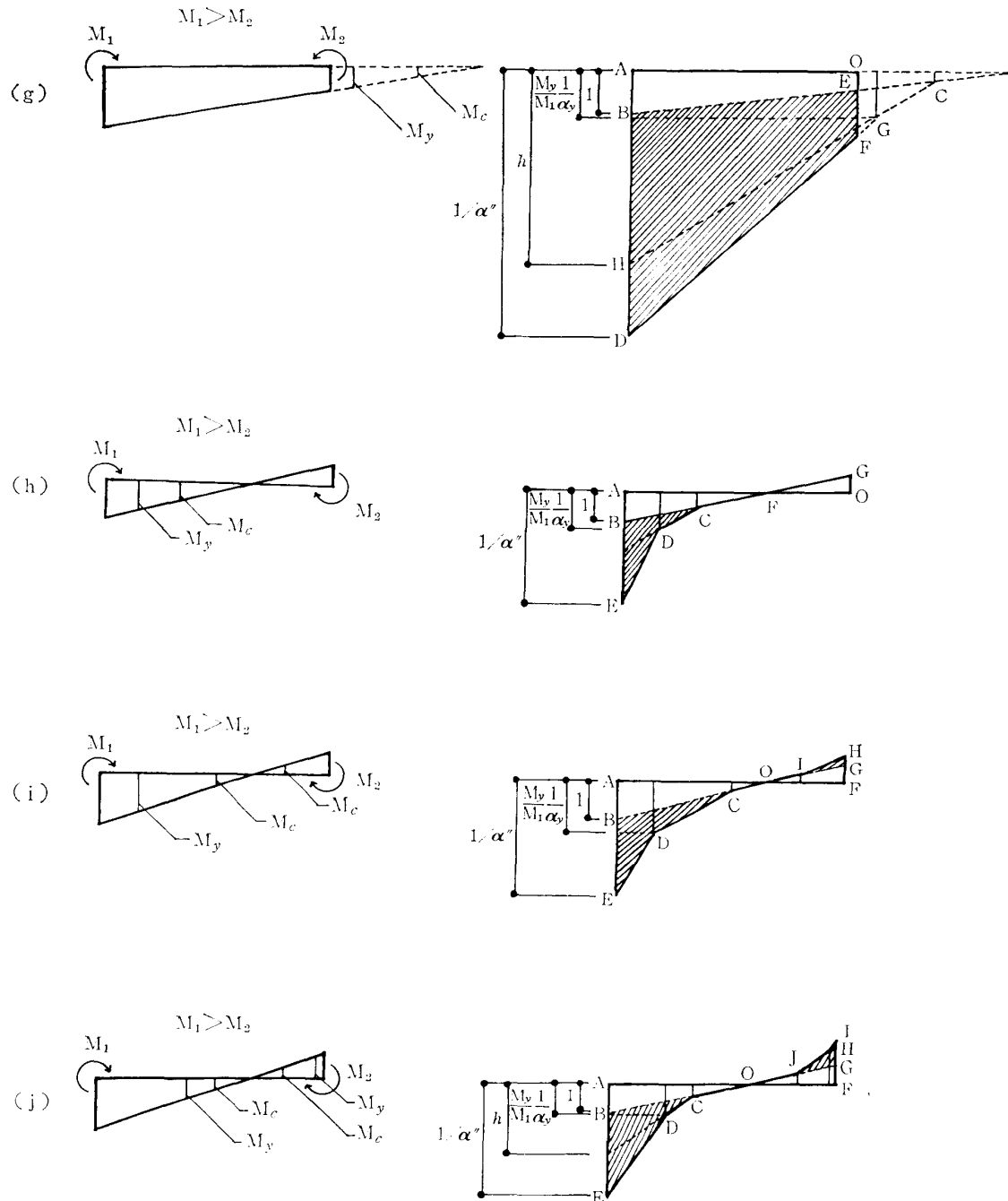


図 4.6 剛性低下率  
Fig. 4.6. Stiffness reduction factor.

$$\frac{1}{\alpha'} = 1 + \frac{M - M_c}{M(M_y - M_c)} \left( \frac{1}{\alpha_y} M_u - M_y \right),$$

$$\frac{1}{\alpha''} = \frac{1}{1 - M_y/M_u} \left\{ \left( 1 - \frac{M_y}{M} \right) \frac{1}{\alpha_u} - \left( 1 - \frac{M_u}{M} \right) \frac{1}{\alpha_y} \right\}.$$

## 5. 梁の強度試験

### 5.1. 概 要

梁については、次の実験を行った。

- 1) ミニモデルによる梁の実験
- 2) 実大梁の曲げ試験
- 3) 付着力を変化させた梁の実験

ミニモデルによる梁の実験は、大型構造部材の実験に先立ち、試験体製作にかかわる練り混ぜと施工性、および鉄筋複合部材の耐力と各養生温度における温度特性等を調べる目的で、モデル化を試み、石膏単体梁、石膏梁および RC 梁に付着力の異なる鉄筋（丸鋼また

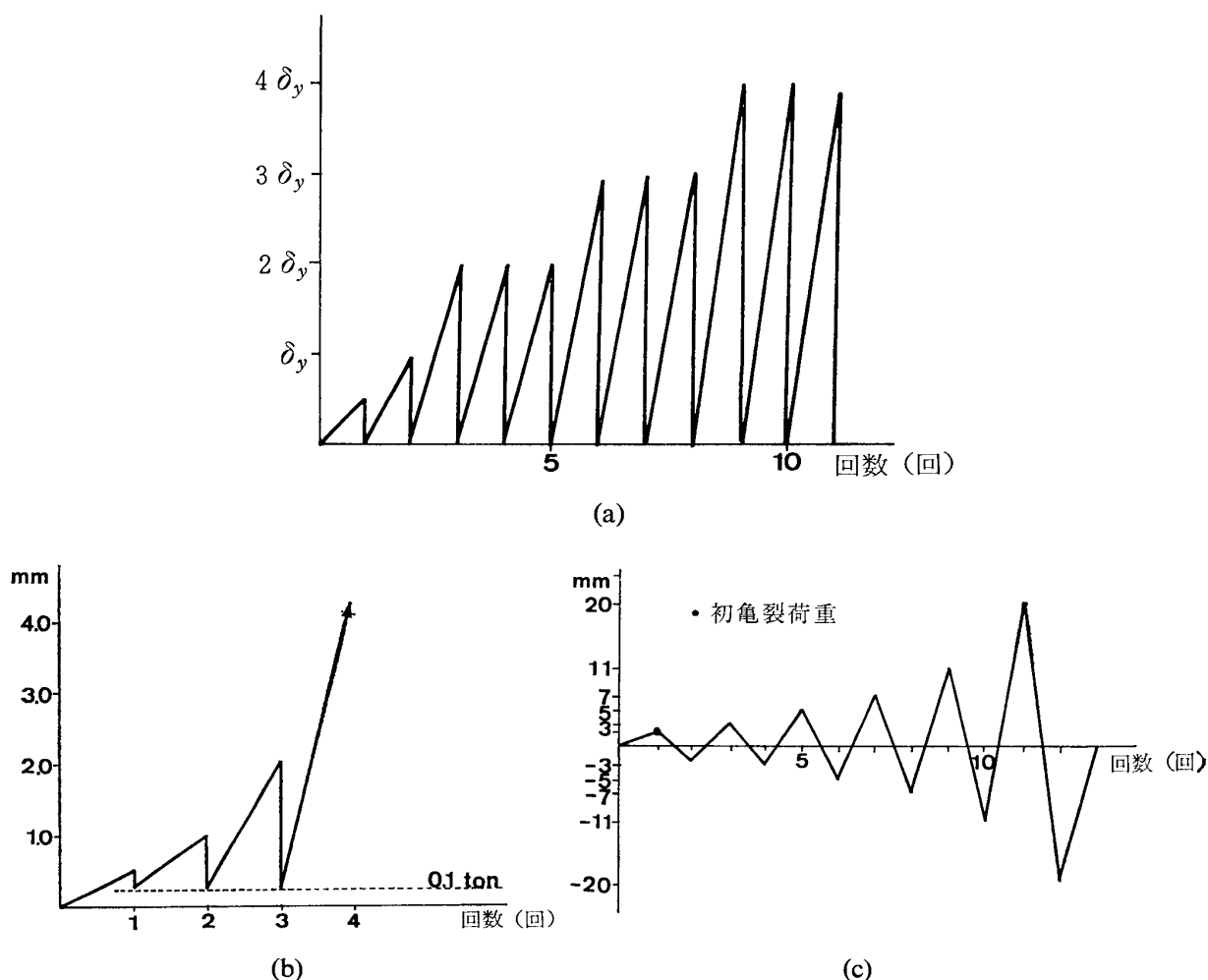


図 5.1 梁の加力計画. (a) ミニ梁, (b) 実大梁, (c) 付着力を変化させた梁

Fig. 5.1. Loading excursion for beam specimens. (a) Small-scaled beam. (b) Full-scaled beam. (c) Beam with different bond property.

は異形鉄筋)を使用し、常温養生 ( $20^{\circ}\text{C}$ ) と低温養生 ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) の試験体について、2点载荷の繰り返し試験を行った。

実大梁の実験では、先のミニモデルの実験結果に基づき、多数回正負繰り返し载荷による強度試験を行い、耐力を検討した。

付着力を変化させた梁の実験では、石膏部材が RC 部材に比べ、その付着力が特に大きな要因をなしているため、付着力に変化をもたせた試験体およびそれと同一試験体に、あらかじめ亀裂を想定して梁中央に切り込みを入れたものに、曲げモーメントおよび剪断力が作用したときの強度、変形および破壊性状を検討した。

それぞれの実験に対応する加力計画を図 5.1 に示す。

## 5.2. ミニモデルによる梁の実験

### 5.2.1. 実験概要

試験体の形状、寸法を図 5.2 に、試験体の種類と記号を表 5.1 に示す。

各試験体の配筋を丸鋼梁は、引張鉄筋  $2-13\phi$  ( $P_t=0.85\%$ )、圧縮鉄筋  $2-9\phi$  ( $P_c=0.40\%$ )、異形鉄筋梁は引張鉄筋  $2-D13$  ( $P_t=0.74\%$ )、圧縮鉄筋  $2-D10$  ( $P_c=0.45\%$ ) とし、あばら筋

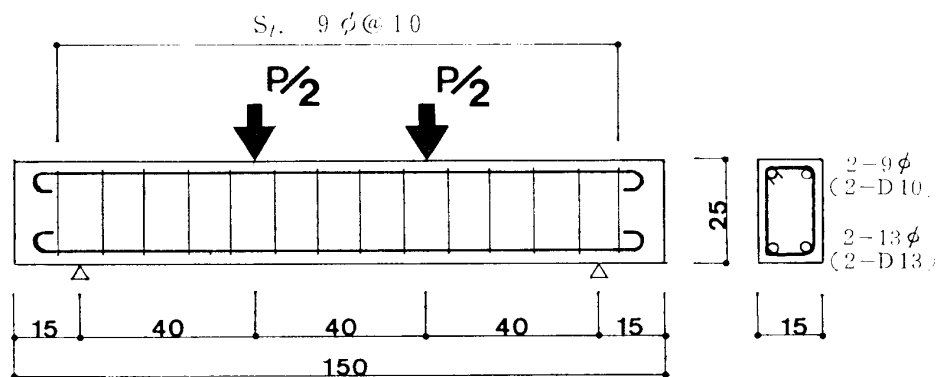


図 5.2 ミニ梁の試験体形状 (単位: cm)

Fig. 5.2. Details of small-scaled beam specimens.

表 5.1 ミニ梁の試験体の種類と記号

Table 5.1. Type and identification of small-scaled beam specimens.

	丸 鋼	異 形 鉄 筋
石 膏 単 体 梁	BG—R・(1), (2), *(3)	BG—D・(1), (2), *(3)
軽 量 石 膏 梁	BGMR・(1), (2), *(3)	BGMD・(1), (2), *(3)
R C 梁	BCOR・(1)	BCOD・(1)
軽 量 R C 梁	BCMR・(1)	BCMD・(1), *(2)

\* 印は低温養生

はすべて  $2-9\phi, 10\text{ cm @ } (P_w=0.85\%)$  とした。

使用材料および調合設計は表 2.1 に準じ、その諸性能を表 5.2, 5.3 に、変位および歪の測定はダイヤルゲージ (1/100 mm) およびストレインゲージを用い、その測定位置を図 5.3 (a), (b), (c) に示す。なお、養生は常温 (20°C) と低温 (−20°C) について行った。

表 5.2 ミニ梁の石膏およびコンクリートの諸性能

Table 5.2. Mechanical properties of small-scaled beam specimens of gypsum and concrete cured under various low temperatures.

	常 温 養 生 (+20°C)		低 温 養 生 (−20°C)	
	圧 縮 強 度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_{1/3}$ ( $\times 10^5$ kg/cm <sup>2</sup> )	圧 縮 強 度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_{1/3}$ ( $\times 10^5$ kg/cm <sup>2</sup> )
石 膏 単 体	312	1.06	188	1.13
軽 量 石 膏	201	1.12	191	1.02
コ ン ク リ ー ト	319	2.59	—	—
軽量コンクリート	223	1.48	194	1.21

表 5.3 ミニ梁の鉄筋の諸性能

Table 5.3. Mechanical properties of reinforcing bars for small-scaled beam specimens.

	断 面 積 (cm <sup>2</sup> )	降伏応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )
13 $\phi$	1.29	3280	4470
D13	1.12	3430	4950

### 5.2.2. 実験結果と考察

諸荷重に対する実験値と計算値を表 5.4 に示す。なお、表中降伏荷重の実験値は、荷重の増加に対し、中央変位の増加が急激に著しくなる点を降伏荷重 ( $P_y$ ) とし、終局荷重の計算値は、次の計算規準の略算式 (日本建築学会, 1975) より求めた。

$$M_u = 0.9a_t \cdot \sigma_y \cdot d \text{ (ton} \cdot \text{cm)}, \quad (5.1)$$

$$P_u = \frac{M_u}{20} \text{ (ton)}. \quad (5.2)$$

#### (1) 初亀裂荷重と温度特性

各試験体の初亀裂荷重の実験値を比べると、石膏単体梁では異形鉄筋梁が丸鋼梁より高く、常温養生の方が低温養生より高い。軽量石膏梁では、丸鋼梁、異形鉄筋梁とも同程度であるが、低温養生では両者ともに低下する。常温養生時における軽量 RC 梁は、その他のものに

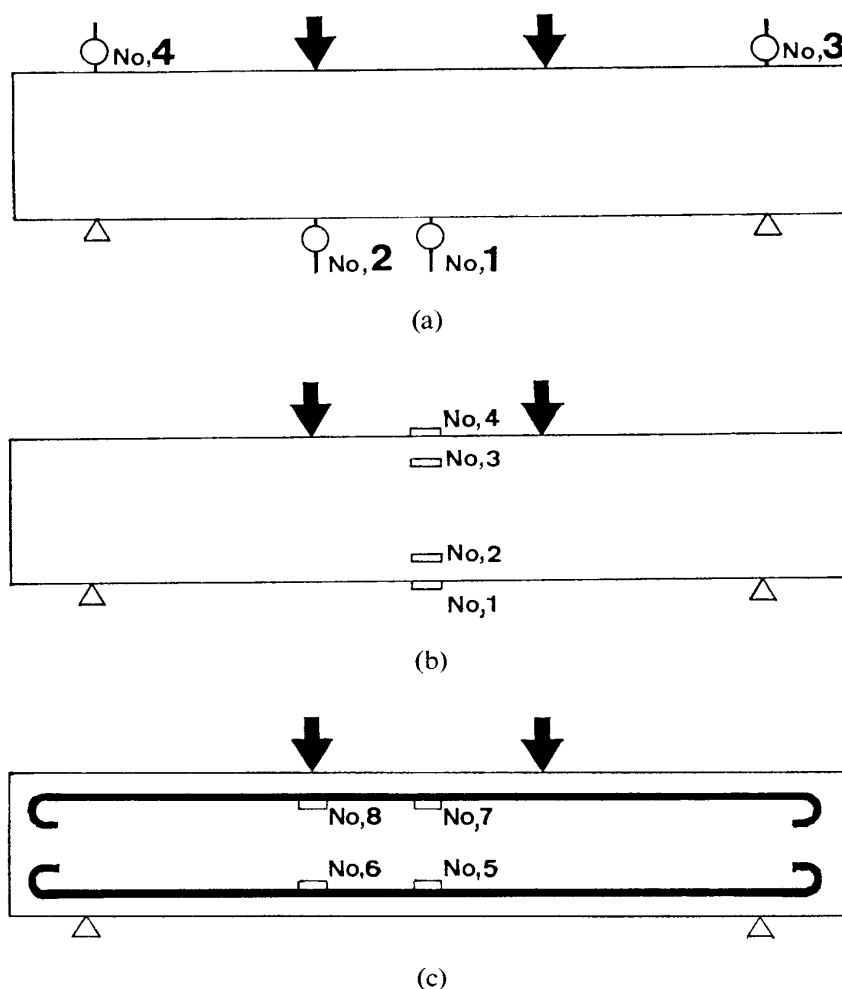


図 5.3 ミニ梁の測定位置. (a) ダイヤルゲージ, (b) ストレインゲージ (試験体表面), (c) ストレインゲージ (鉄筋)

Fig. 5.3. Measuring points of small-scaled beam. (a) Positions of dial gauges attached to specimen. (b) Positions of wire strain gauges attached to the surface of specimens. (c) Positions of wire strain gauges attached to the reinforcing bars.

比べ、低い値である。また、計算値は石膏、およびコンクリートのすべての引張応力度を、

$$\sigma_t = 1.8\sqrt{F_c} \quad (5.3)$$

で推定したため、それらに近似した引張強度とはいいがたく、実験値との比較では大きなばらつきがあった。

## (2) 剪断亀裂

低温養生では、すべての試験体に剪断亀裂が発生しているのに対し、常温養生の場合、石膏単体梁、軽量石膏梁に丸鋼を用いたものに太い曲げ亀裂が生じ剪断亀裂は現れなかった。なお、異形鉄筋梁の一部についてのみ剪断亀裂が現れている。

表 5.4 ミニ梁の実験結果および計算結果 (単位, ton)  
 Table 5.4. Test results and predicted ones on small-scaled beam.

試 験 体		初 亀 裂 荷 重			剪断亀裂荷重			降伏荷重	終 局 荷 重		
		実験値	計算値	実/計	実験値	計算値	実/計	実験値	実験値	計算値	実/計
常 温 養 生	B G—R・(1)	3.5	3.49	1.00	—	6.71	—	8.0	9.4	8.21	1.14
	B G—R・(2)	3.0	3.49	0.86	—	6.71	—	7.0	9.2	8.21	1.12
	B G—D・(1)	4.3	3.04	1.41	10.0	6.71	1.49	9.5	11.5	8.23	1.40
	B G—D・(2)	4.7	3.04	1.55	—	6.71	—	7.0	9.2	8.23	1.12
	B GMR・(1)	4.0	2.80	1.43	—	5.79	—	9.0	9.6	8.21	1.17
	B GMR・(2)	3.5	2.80	1.25	—	5.79	—	8.0	9.5	8.21	1.16
	B GMD・(1)	4.0	2.44	1.64	—	5.79	—	9.5	9.6	8.23	1.17
	B GMD・(2)	3.5	2.44	1.43	8.0	5.79	1.38	10.5	10.9	8.23	1.32
	B C O R・(1)	3.0	3.03	0.99	—	6.77	—	9.5	10.2	8.21	1.24
	B C O D・(1)	4.0	2.98	1.34	9.5	6.77	1.40	9.0	10.2	8.23	1.24
	B C M R・(1)	2.0	2.71	0.74	3.5	5.97	0.59	9.5	9.6	8.21	1.17
	B C M D・(1)	2.0	2.43	0.82	6.5	5.97	1.09	7.5	9.2	8.23	1.12
低 温 養 生	B G—R・(3)	3.8	2.71	1.40	6.5	5.68	1.14	8.0	9.7	8.21	1.18
	B G—D・(3)	3.5	2.36	1.48	5.0	5.68	0.88	6.5	10.1	8.23	1.23
	B GMR・(3)	3.0	2.74	1.09	6.5	5.71	1.14	9.0	9.4	8.21	1.14
	B GMD・(3)	3.0	2.38	1.26	8.0	5.71	1.40	8.5	10.2	8.23	1.24
	B C M D・(2)	3.2	2.26	1.42	9.0	5.73	1.57	8.5	10.0	8.23	1.22

### (3) 終局荷重

丸鋼梁と異形鉄筋梁を比べると、後者が降伏時の鉄筋の引張合力 ( $a_t \cdot \sigma_y$ ) は低い但最终耐力にはあまり差がなかった。

また、常温養生と低温養生を比較すると、石膏またはコンクリートの圧縮強度に相違があるにもかかわらず、終局耐力はほとんど変わらなかった。

### (4) 剛性

$P-\delta$  曲線を図 5.4 に示す。図中、異形鉄筋梁は最初のスタートを 1 mm ずらして表してある。

図より初期剛性を比較すると、丸鋼梁と異形鉄筋梁では後者の方が高く、常温養生と低温養生では後者の方がやや低い。なお、降伏時剛性はほとんど同程度である。

### (5) 亀裂の性状

常温養生の梁についての亀裂図を図 5.5 に示す。なお、すべての図は中心線より左に丸鋼梁、右に異形鉄筋梁の亀裂を示した。



図より明らかなように、丸鋼梁は異形鉄筋梁に比べ亀裂本数が少なく、亀裂幅が広い。これは、特に BG-R と BG-D を比べるとわかる (図 5.5(a))。

また軽量骨材を混入することにより、付着性能が改良され、石膏単体梁より軽量石膏梁の方が亀裂本数が増し、亀裂幅が小さくなる。なお、低温養生もほぼ同じ特性を示した。

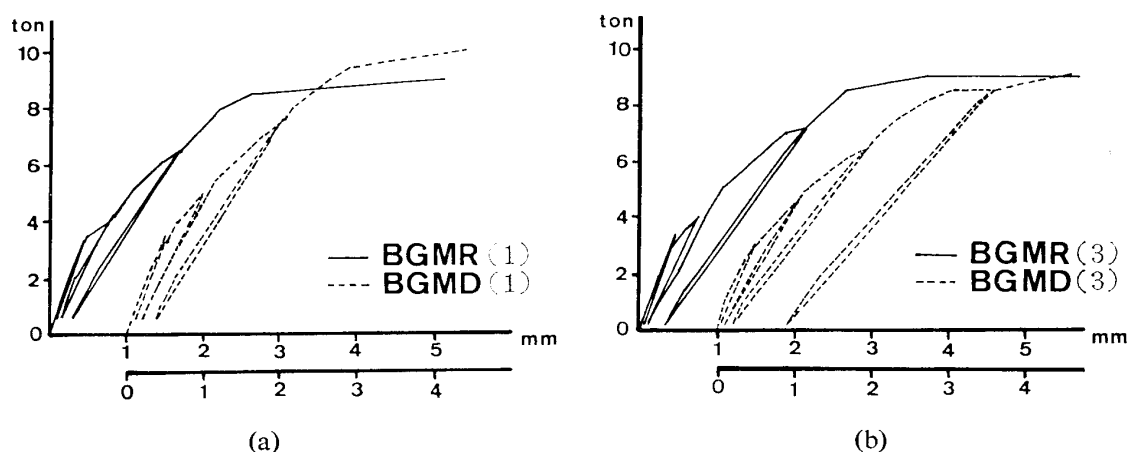


図 5.4 ミニ梁の  $P-\delta$  曲線。(a) 常温養生 ( $+20^{\circ}\text{C}$ )、(b) 低温養生 ( $-20^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 5.4. Measured load-deflection curve of small-scaled beam specimens. (a) Curing under temperature of  $20^{\circ}\text{C}$ . (b) Curing under temperature of  $-20^{\circ}\text{C}$ .

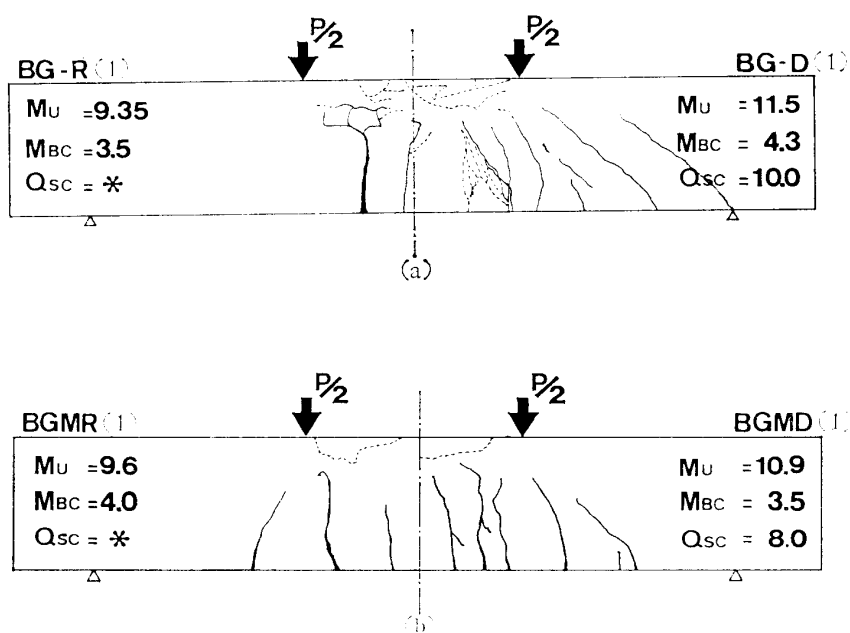


Fig. 5.5

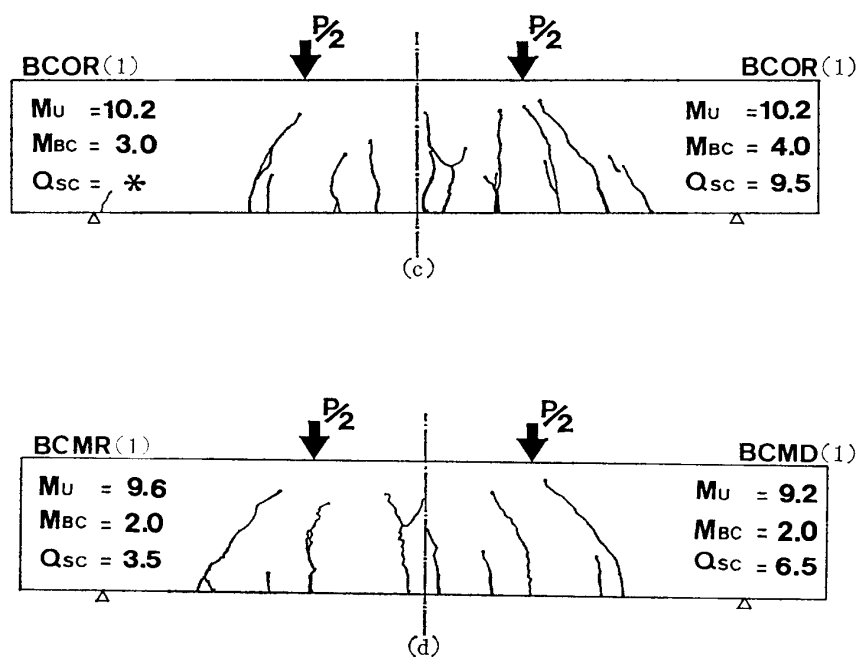


図 5.5 ミニ梁の亀裂図 (単位: ton)

Fig. 5.5. Crack diagram of small-scaled beam specimen.

### 5.3. 実大梁の曲げ試験

#### 5.3.1. 実験概要

試験体の形状、寸法を図 5.6 に、種類を表 5.5 に示す。引張鉄筋、圧縮鉄筋とも、3-D25 (鉄筋比  $P_t = P_c = 0.925\%$ )、あばら筋を 2-D10, 15 cm @ (あばら筋比  $P_w = 0.316\%$ ) に配筋した。

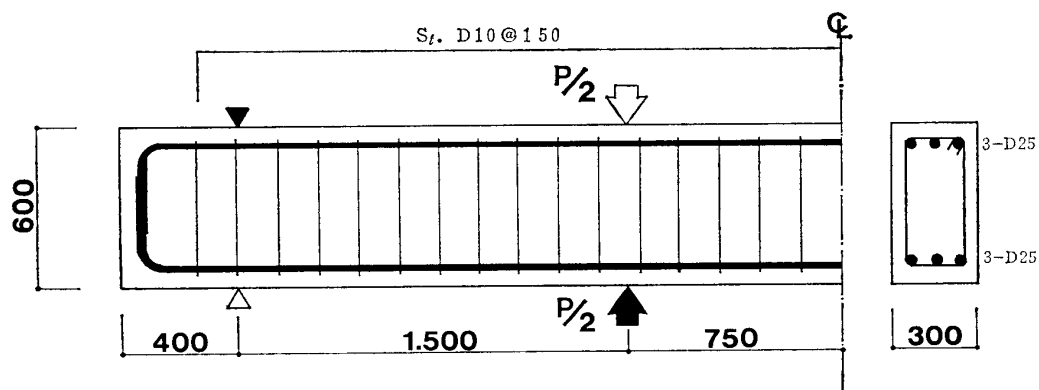


図 5.6 実大梁試験体形状 (単位: mm)

Fig. 5.6. Details of full-scaled beam specimen.

調合設計を表 5.6 に、使用材料の諸性能を表 5.7, 5.8, 付着応力度 (D25 と D10 を使用, 付着長さ  $l=15$  cm) を表 5.9 に示す.

なお, 石膏は打ち込み温度による強度への影響を考慮し, 今回の打設が真夏 (外気温  $32^{\circ}\text{C}$ ) であったため, 水に氷を混入した. 打ち上がり温度は  $23^{\circ}\text{C}$  であった.

載荷方法および変位と歪の測定位置を図 5.7 (a), (b), (c) に示し, 実験装置を図 5.8 に示す.

表 5.5 実大梁の試験体の種類と記号

Table 5.5. Type and identification of full-scaled beam specimens.

名 称	記 号	養 生
石 膏 梁	B G M D • (1)	4 週 強 度
	B G M D • (2)	8 週 強 度
R C 梁	B C O D • (1)	4 週 強 度
	B C O D • (2)	4 週 強 度

表 5.6 実大梁の調合設計

Table 5.6. Mixture proportions of full-scaled beam specimens.

	スランプ (cm)	水 ( $l/m^3$ )	石膏またはセメント ( $kg/m^3$ )	粗骨材 ( $kg/m^3$ )	細骨材 ( $kg/m^3$ )	他
軽 量 石 膏	25	159	488	574	484	硬化剤, 減水剤
コ ン ク リ ー ト	15	157	266	858	731	減水剤

表 5.7 実大梁の石膏およびコンクリートの諸性能

Table 5.7. Mechanical properties of full-scaled beam specimens of gypsum and concrete.

	圧 縮 強 度 ( $kg/cm^2$ )	引 張 強 度 ( $kg/cm^2$ )	ヤング係数 $E_{1/3}$ ( $\times 10^5$ $kg/cm^2$ )	ポアソン比 ( $\nu$ )
軽 量 石 膏	283	24.6	1.36	0.18
コ ン ク リ ー ト	267	19.9	2.52	0.14

表 5.8 実大梁の鉄筋の諸性能

Table 5.8. Mechanical properties of full-scaled beam specimens of reinforcing bars.

	引 張 強 度 ( $kg/cm^2$ )	降 伏 強 度 ( $kg/cm^2$ )	ヤング係数 ( $\times 10^6$ $kg/cm^2$ )	伸 び 率 (%)
鉄 筋	5350	3280	1.66	23.1

表 5.9 実大梁の付着強度 (単位,  $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

Table 5.9. Results of bond test on full-scaled beam specimens.

		D25	D10
軽 量 石 膏	0.025 mm 時	29.8	81.1
	最大耐力	75.2	*
コ ン ク リ ー ト	0.025 mm 時	13.1	31.5
	最大耐力	39.2	*

\* 印は鉄筋切断

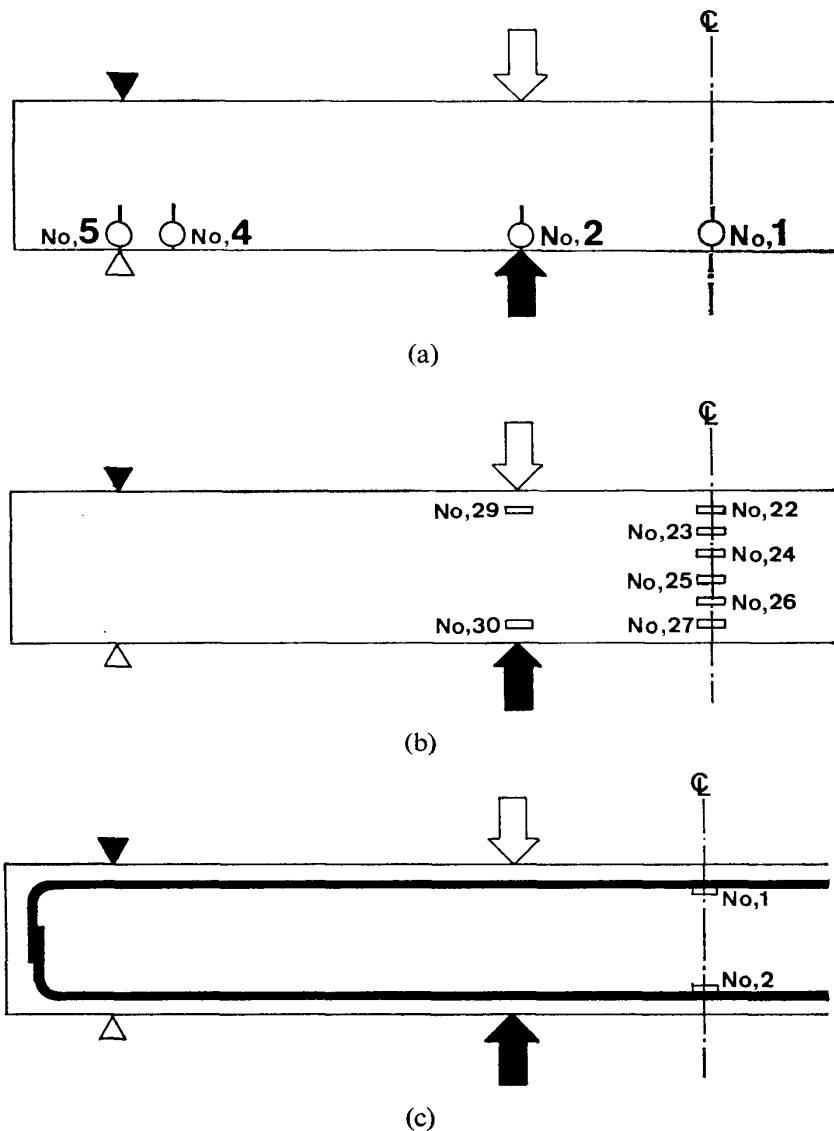


図 5.7 実大梁の測定位置. (a) ダイアルゲージ, (b) ストレインゲージ (試験体表面), (c) ストレインゲージ (鉄筋)

Fig. 5.7. Measured points of full-scaled beam specimens. (a) Positions of dial gauges attached to specimen. (b) Positions of wire strain gauges attached to the surface of specimens. (c) Positions of wire strain gauges attached to the reinforcing bars.

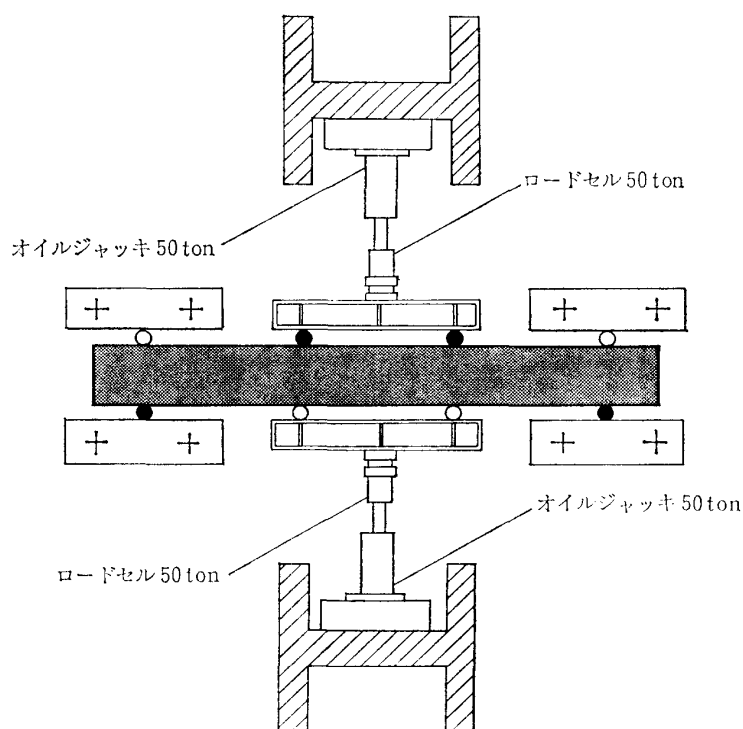


図 5.8 実大梁の実験装置

Fig. 5.8. Test setup for full-scaled beam specimen.

### 5.3.2. 実験結果と考察

表 5.10 に諸亀裂荷重および剛性を示し、図 5.9 に実験終了後に書き写した亀裂図を、図 5.10, 5.11 に各試験体の  $P-\delta$  曲線および  $P-\varepsilon$  曲線を示す。なお、図 5.11 の図中の番号は図 5.7 (c) による。

#### (1) 曲げ初亀裂荷重

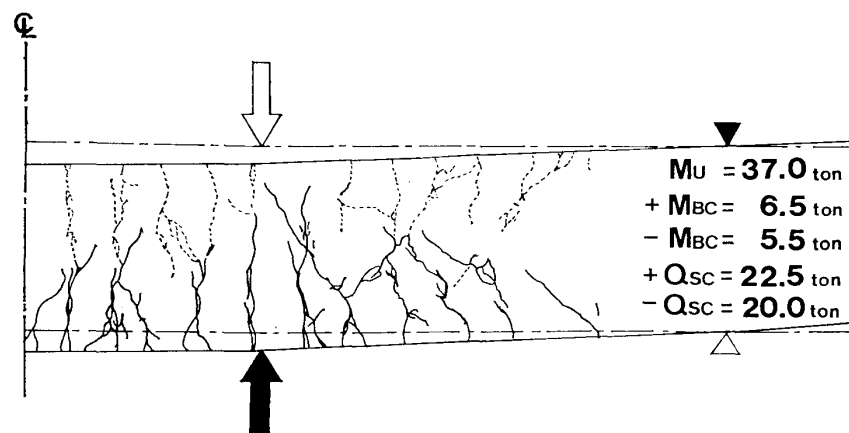
実験値と計算値を比較すると、石膏梁の場合は計算値の方が高く、RC 梁は低い値を示す傾向にあるが、双方ともに大きなばらつきがある。

#### (2) 曲げ剪断亀裂荷重およびその他の諸荷重

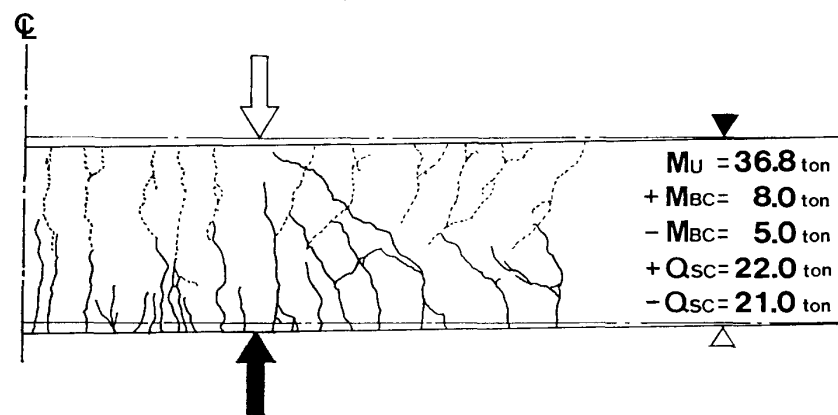
曲げ剪断亀裂荷重は石膏梁、RC 梁とも同程度の値を示し、実験値/計算値は 20% 前後の相違である。その他の諸荷重は 15% 前後の相違で比較的一致した。

#### (3) $P-\delta$ 曲線

弾性範囲内の  $P-\delta$  曲線 (図 5.10) について比較すると、剛性はほぼ同程度である。また、図 5.12 (a), (b) に実験値の包絡線と計算値を示す。この図から実験値と計算値の剛性は石膏梁、RC 梁とも計算値の方がやや高い。



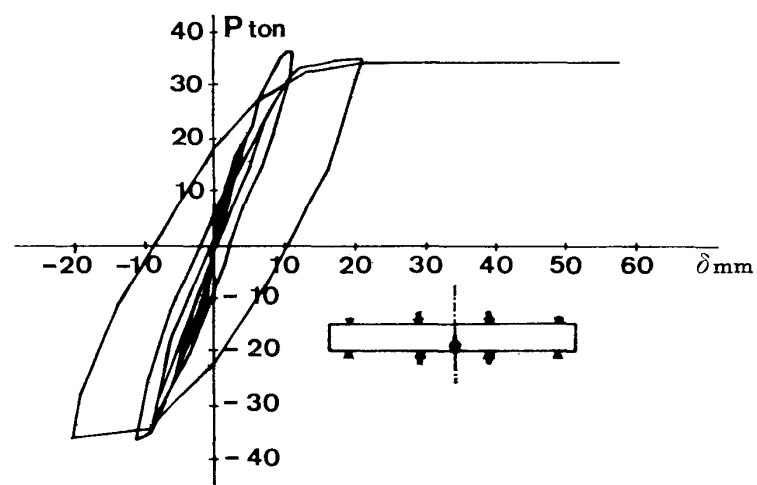
(a) BGMD (1)



(b) BCOD (1)

図 5.9 実大梁の亀裂図

Fig. 5.9. Crack diagram of full-scaled beam specimen.



(a) BGMD (1)

Fig. 5.10.

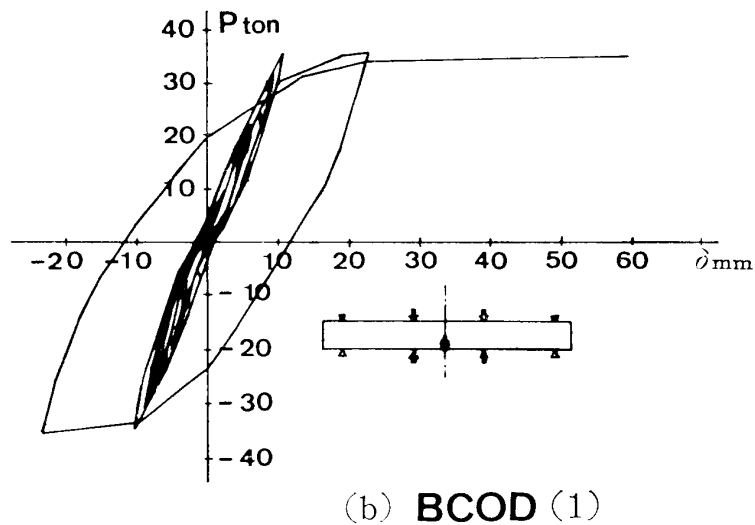
図 5.10 実大梁の  $P-\delta$  曲線

Fig. 5.10. Load-deflection curve of full-scaled beam specimen.

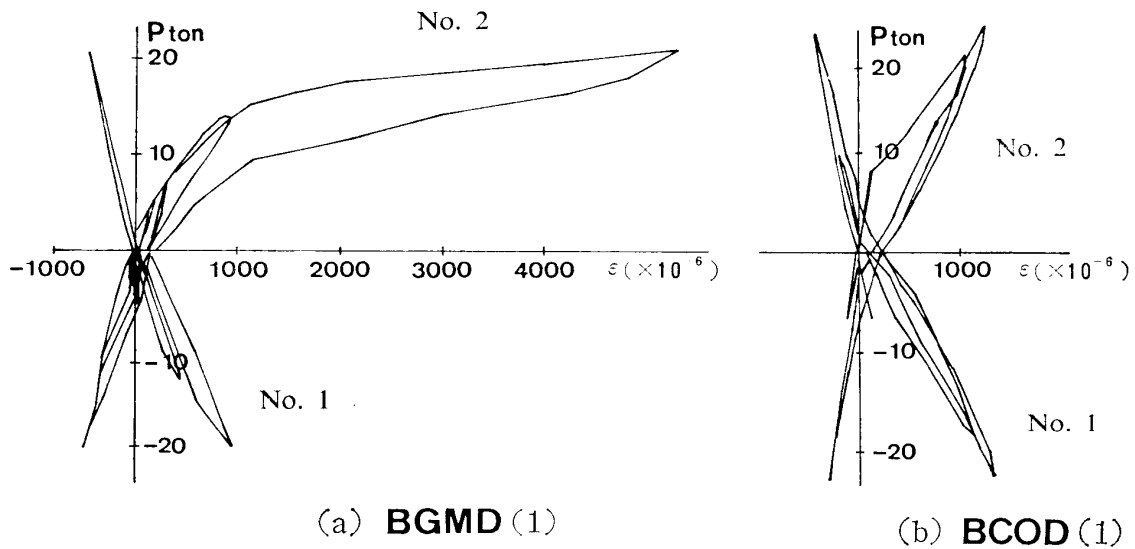
図 5.11 実大梁の  $P-\epsilon$  曲線

Fig. 5.11. Load-strain curve of reinforcing bar of full-scaled beam specimen.

これは剪断変形無視および実験装置の影響によるものと思われる。

#### (4) 終局荷重と比強度 (強度/比重)

終局荷重と見かけの比重に対する比を表 5.11 に示す。表より比強度は軽量石膏梁の方が 50% 程度高い値を示した。これは、圧縮強度や引張強度についても同じである。

表 5.10 実大梁の実験結果と計算結果

Table 5.10. Test results and predicted ones on full-scaled beam specimens.

試 験 体		BGMD・(1)		BGMD・(2)		BCOD・(1)		BCOD・(2)	
		正	負	正	負	正	負	正	負
初亀裂荷重 (ton)	実験値	6.5	5.5	4.0	4.0	8.0	5.0	8.0	6.0
	計算値	6.3	6.3	6.3	6.3	4.3	4.3	4.3	4.3
	実 / 計	1.03	0.87	0.63	0.63	1.86	1.16	1.86	1.40
曲げ剪断 亀裂荷重 (ton)	実験値	13.0	11.0	12.0	13.0	12.0	13.0	11.0	13.0
	計算値	12.5	12.5	12.5	12.5	10.7	10.7	10.7	10.7
	実 / 計	1.04	0.88	0.96	1.04	1.12	1.21	1.03	1.21
剪断亀裂 荷重 (ton)	実験値	22.5	20.0	22.0	21.0	22.0	21.0	26.0	21.0
	計算値	23.8	23.8	23.8	23.8	23.2	23.2	23.2	23.2
	実 / 計	0.95	0.84	0.92	0.88	0.95	0.91	1.12	0.91
降伏荷重 (ton)	実験値	33.5	35.0	37.0	37.0	36.0	36.0	36.8	36.0
	計算値	33.0	33.0	33.0	33.0	33.2	33.2	33.2	33.2
	実 / 計	1.01	1.06	1.15	1.15	1.08	1.08	1.13	1.08
曲げ終局 荷重 (ton)	実験値	37.0	37.0	38.0	38.0	36.8	36.2	37.5	36.2
	計算値	34.8	34.8	34.8	34.8	34.8	34.8	34.8	34.8
	実 / 計	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.04	1.06	1.04
弾性剛性 $\times 10^3$ ton/rad	実験値	7.22	7.44	8.00	8.00	5.11	5.11	5.11	5.11
	計算値	8.97	8.97	8.97	8.97	5.61	5.43	5.61	5.17
	実 / 計	0.80	0.83	0.89	0.89	0.91	0.94	0.91	0.99
降伏時剛性 $\times 10^3$ ton/rad	実験値	5.29	5.37	8.19	5.48	6.37	6.43	7.37	5.29
	計算値	4.50	4.50	4.50	4.50	4.18	4.18	4.18	4.18
	実 / 計	1.18	1.19	1.82	1.22	1.52	1.54	1.76	1.27

表 5.11 実大梁の比重と強度

Table 5.11. Specific gravities and strength of full-scaled beam specimens.

試 験 体	比 重 ( $\gamma$ )	終局荷重 $P_u$ (ton)	$P_u/\gamma$
BGMD・(1)	1.523	37.0	24.29
BGMD・(2)		38.0	24.95
BCOD・(1)	2.220	36.8	16.58
BCOD・(2)		37.5	16.89



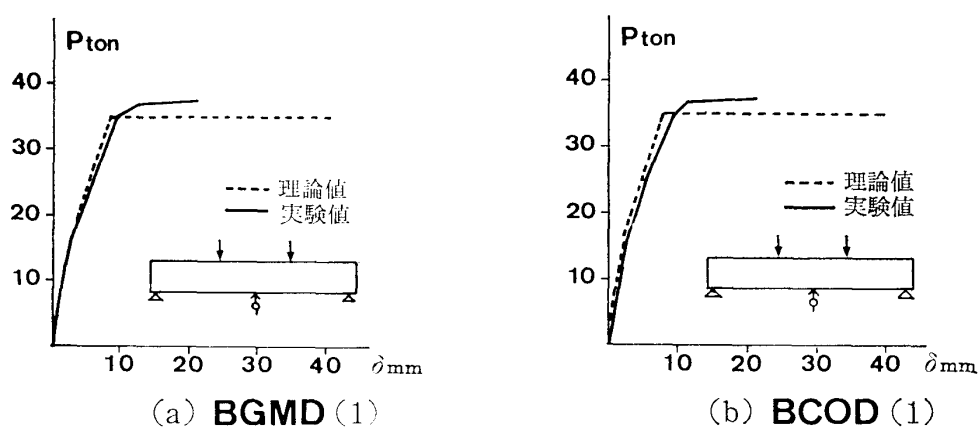
図 5.12 実大梁の実験値と計算値の  $P-\delta$  曲線

Fig. 5.12. Experimental and calculated load-deflection curves of full-scaled beam specimen.

#### 5.4. 付着力を変化させた梁の実験

##### 5.4.1. 実験概要

試験体の形状、寸法を図 5.13 に示す。

試験体の両端は厚さ 6 mm の鉄板 ( $100 \times 200$  mm) を主筋に溶接またはボルト接合した。

試験体の種類は、単筋梁（試験体記号 4 桁目のサフィックス S）および複筋梁（同サフィックス D），（複筋比  $\gamma=1$ ）でそれぞれ異形鉄筋 D16 ( $a_t=1.99 \text{ cm}^2$ ,  $P_t=1.24\%$ ), 丸鋼 16  $\phi$  ( $a_t=2.01 \text{ cm}^2$ ,  $P_t=1.26\%$ ) および付着応力度を 0 に近づけるため、丸鋼にグリースを塗り、その上にホウタイを一重にまき、ビニールテープで定着したもの 12 体、および上記と同一試験体で梁中央部に厚さ 2 mm のアクリル板を用い切り込みを入れたもの 12 体、計 24 体とした。なお、あばら筋はすべての試験体とも 6  $\phi$ , 6 cm @ ( $P_w=0.47\%$ ) とした。これらの試験体番号を表 5.12 に示す。

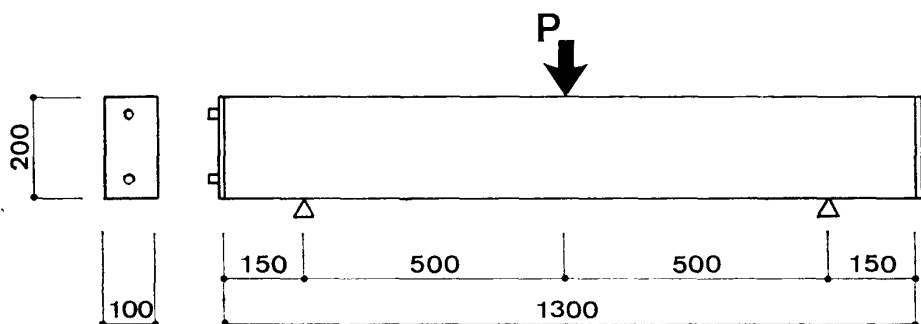


図 5.13 付着力を変化させた梁の試験体形状 (単位: mm)

Fig. 5.13. Details of specimen with different bond property.



表 5.15 付着力を変化させた梁の鉄筋の諸性能

Table 5.15. Mechanical properties for reinforcing bars of beam specimens with different bond properties.

	降伏応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ( $\times 10^8$ kg/cm <sup>2</sup> )	伸び率 (%)
S D 30. D 16	3819	5771	1.71	23
S R 30. 16 $\phi$	3060	4480	1.95	30
S R 24. 16 $\phi$	2433	3262	1.95	38
S R 24. 6 $\phi$	2893	4202	—	32

表 5.16 付着力を変化させた梁の付着応力度 (単位, kg/cm<sup>2</sup>)

Table 5.16. Bond stresses of beam specimens with different bond properties.

	D 16		16 $\phi$		16 $\phi$ グリース, ハウタイ, セロテープ使用
	0.025 mm 時	最 大	0.025 mm 時	最 大	
軽 量 石 膏	57.0	74.0	29.0	32.0	0
コ ン ク リ ー ト	46.3	96.0	26.5	29.2	0

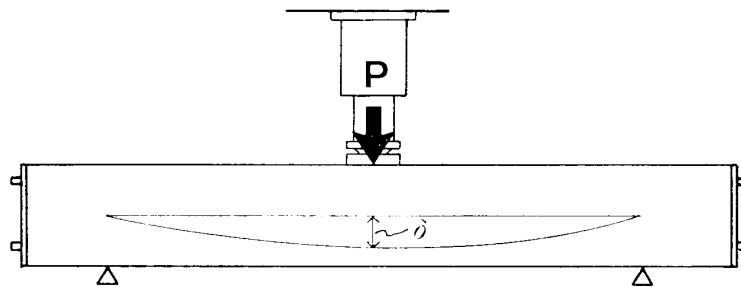


図 5.14 付着力を変化させた梁の実験装置

Fig. 5.14. Test setup for specimen with different bond property.

#### 5.4.2. 実験結果と考察

実験結果および計算結果の一覧を表 5.17 に、各試験体の  $P-\delta$  曲線を 図 5.16 (a)~(x) に示し、複筋梁の  $P-\delta$  曲線と  $BCOR_D$ ,  $BCOR_D \cdot B_0$  の  $P-\varepsilon$  曲線の包絡線および計算結果を図 5.17, 5.18 に示す。なお、図中の番号は図 5.15 (a), (b) による。

##### (1) 初亀裂荷重

表 5.14 より石膏とコンクリートの引張強度がほぼ等しいことから、すべての試験体とも 1 ton 前後の荷重で亀裂が生じ、 $BGMD_D$  以外は計算値の方がやや高く、実験値、計算値は比較的一致した。

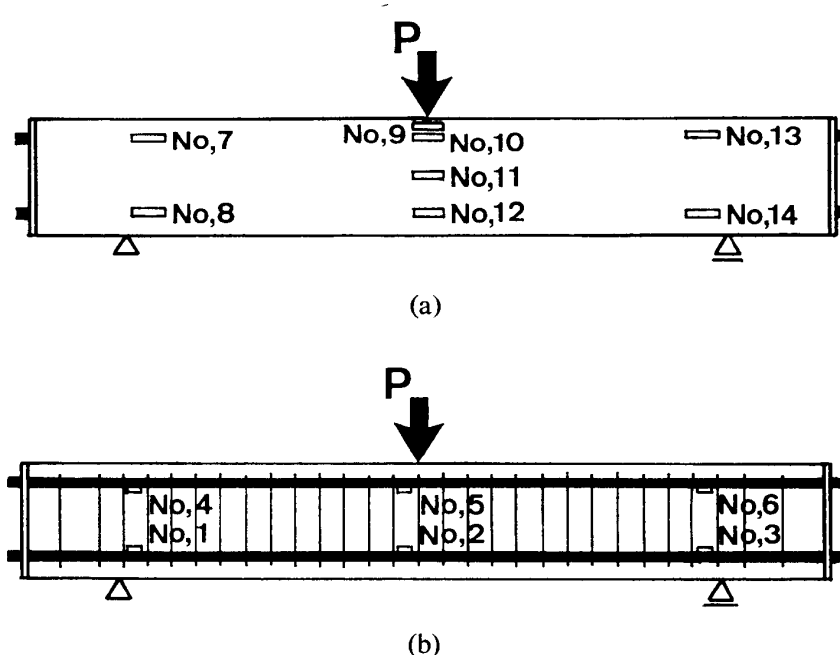


図 5.15 付着力を変化させた梁の測定位置.

(a) ストレインゲージ (試験体表面), (b) 鉄筋 (単筋の場合 No. 1~No. 3)

Fig. 5.15. Strain measuring points of specimen with different bond property. (a) Positions of wire strain gauges attached to the surface of specimens. (b) Positions of wire strain gauges attached to the reinforcing bars.

## (2) 降伏荷重

鉄筋の降伏応力度が異なるため、実験値と計算値の比較をすると、付着力 0 ( $B_0$ ) の試験体では一部計算値の方が高く、その他は実験値の方が高くなった。

## (3) 曲げ終局荷重

切り込みを入れた場合 ( $T_0$ )、単筋梁、複筋梁とも強度が少し減少するが、丸鋼の場合はあまり差が見られない。また、計算値と実験値の比較では、実験値の方が高い値を示した。

## (4) 剪断破壊

剪断破壊は異形鉄筋梁に生じ、剪断終局荷重の計算値と実験値は 8% 以内で一致した。

## (5) 変形状態

切り込みの有無による差はあまり見られないが、付着力が 0 の場合は、切り込みがあるものの方が少し大きく、降伏時においても約 2 倍の変形量を示し、計算値に近似した。

また、図 5.18 で見るように付着力が 0 の場合、圧縮鉄筋に圧縮応力が働いているとき、圧縮側の鉄筋応力は付着力のある場合に比べ低くなり、逆にコンクリート応力が高くなった。

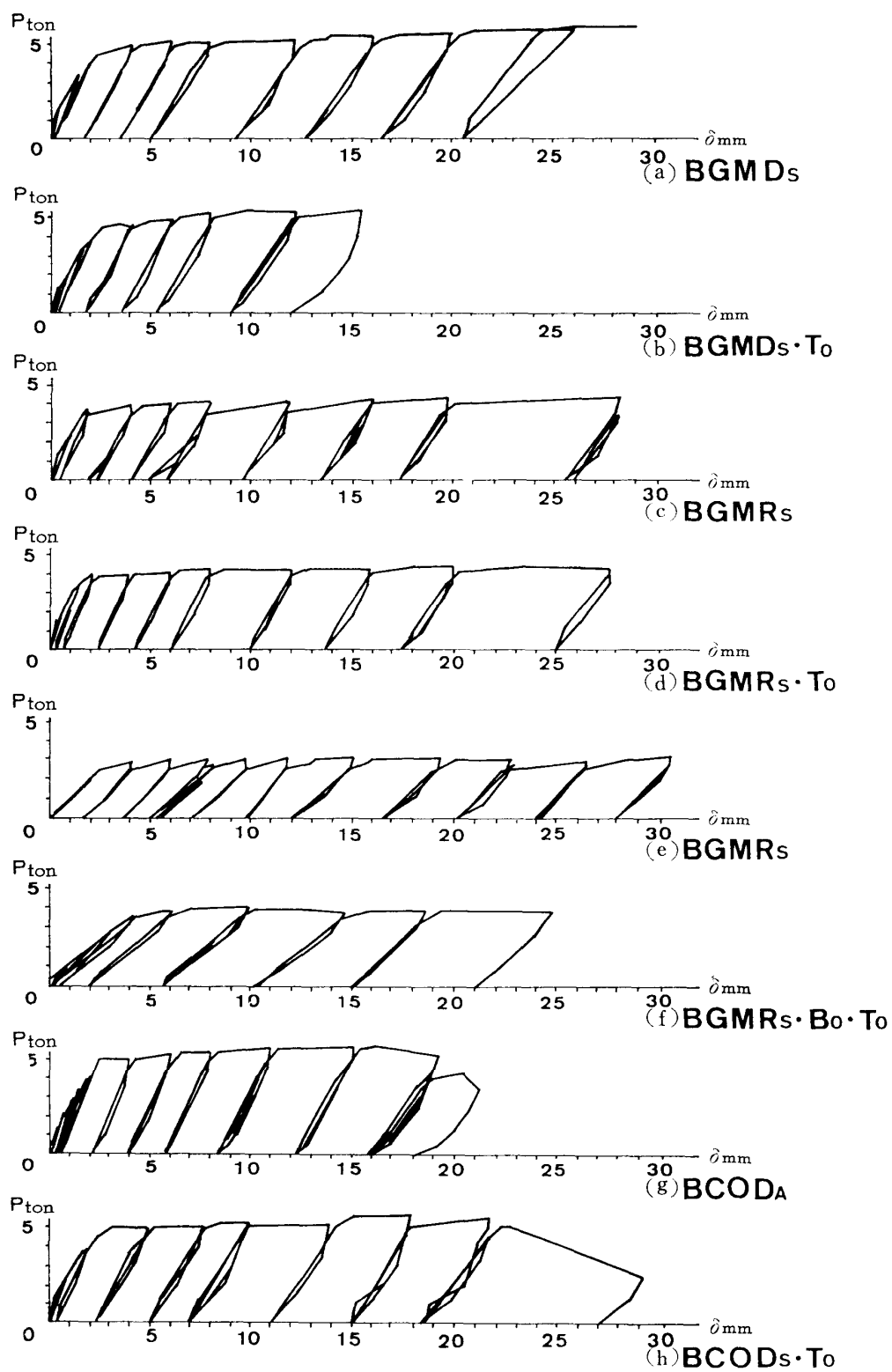


Fig. 5.16.

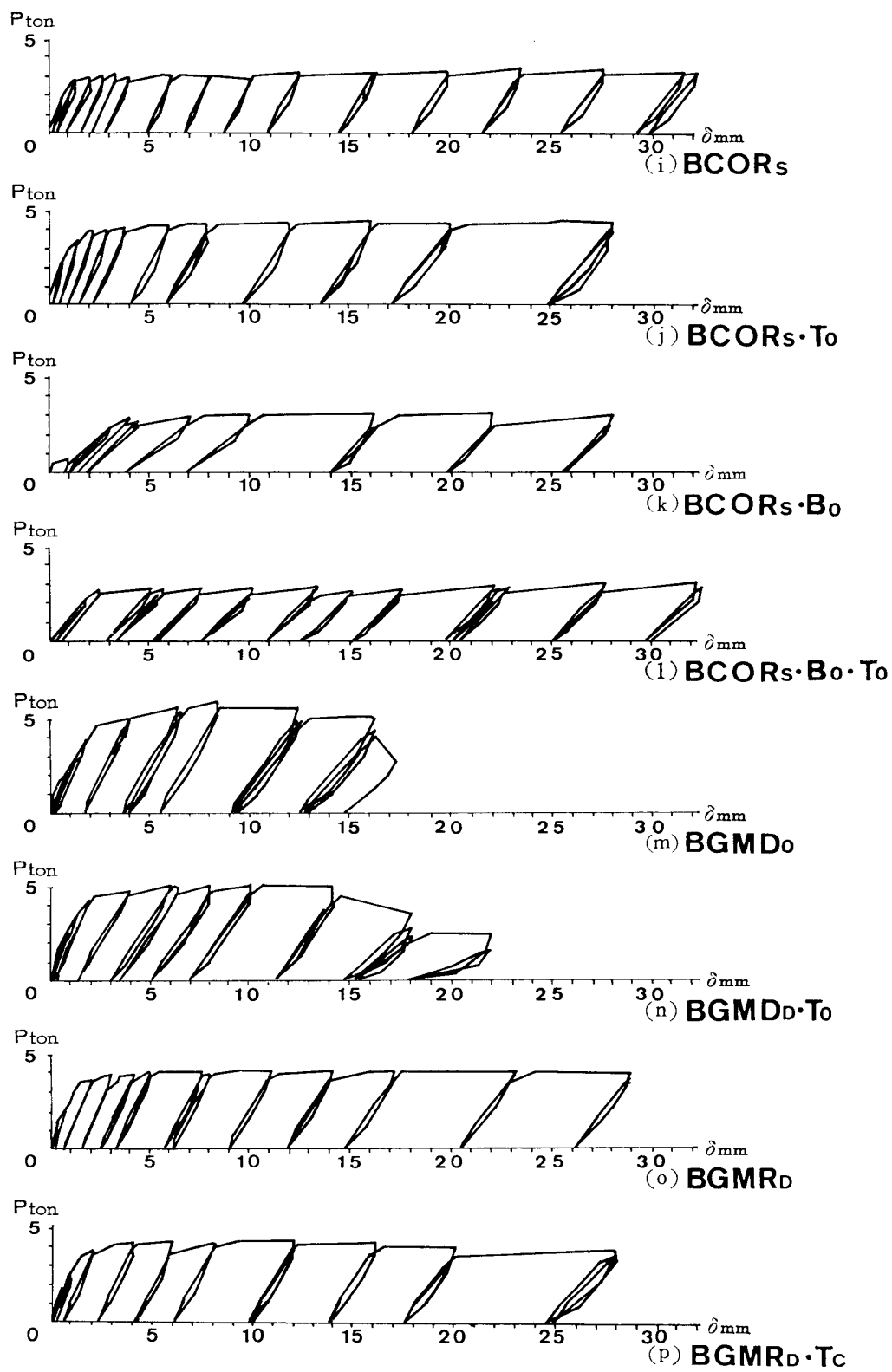


Fig. 5.16.

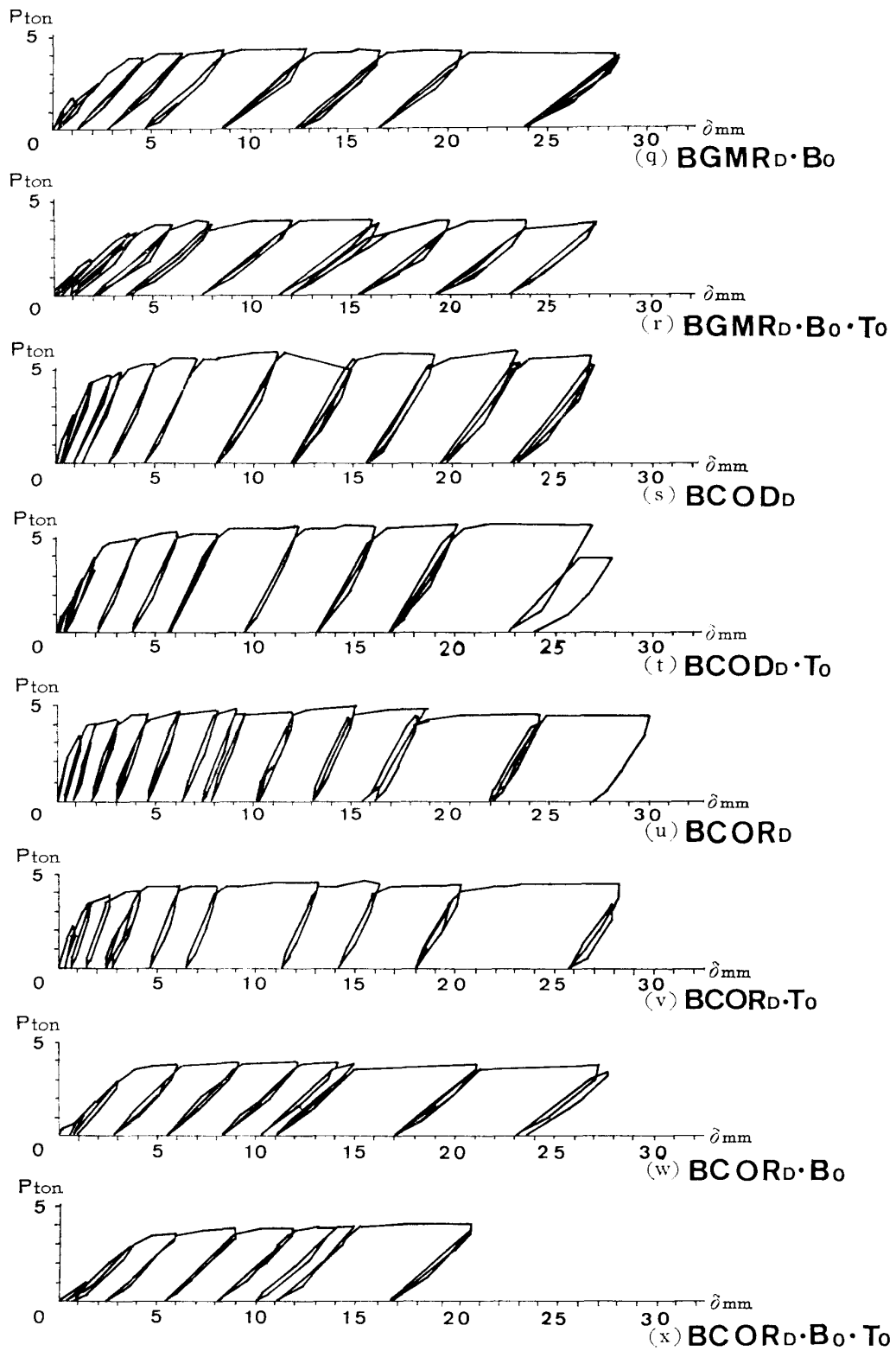


図 5.16 付着力を変化させた梁の  $P-\delta$  曲線

Fig. 5.16. Load-deflection curve of specimens with different bond property.

表 5.17 付着力を変化させた  
Table 5.17. Test results and predicted ones of

試 験 体			初亀裂荷重 (ton)			降伏荷重 (ton)			曲げ終局荷重 (ton)				
			実験	計算	実/計	実験	計算	実/計	実験	計(e法)	実/計	計終局荷重	実/計
単 筋 梁	石 膏	BGMD <sub>S</sub>	1.0	1.06	0.94	4.8	4.00	1.20	5.8	4.46	1.30	4.41	1.32
		BGMD <sub>S</sub> ・T <sub>0</sub>	—	—	—	4.5	4.00	1.13	5.4	4.46	1.21	4.41	1.22
		BGMR <sub>S</sub>	1.0	1.09	0.92	3.8	3.46	1.04	4.3	3.67	1.17	3.64	1.18
		BGMR <sub>S</sub> ・T <sub>0</sub>	—	—	—	3.9	3.46	1.07	4.3	3.68	1.16	3.64	1.18
		<sup>3)</sup> BGMR <sub>S</sub> ・B <sub>0</sub>	0.8	1.09	0.73	2.5	2.76	0.91	3.1	2.96	1.04	2.94	1.05
		BGMR <sub>S</sub> ・B <sub>0</sub> ・T <sub>0</sub>	—	—	—	3.6	3.46	1.04	4.1	3.68	1.11	3.64	1.13
	コン クリ ート	BCOD <sub>S</sub>	0.8	1.01	0.97	5.0	4.31	1.16	5.7	4.47	1.28	4.42	1.29
		BCOD <sub>S</sub> ・T <sub>0</sub>	—	—	—	5.0	4.31	1.16	5.6	4.47	1.25	4.42	1.27
		BCOR <sub>S</sub>	1.0	1.03	0.97	3.7	3.50	1.06	4.5	3.68	1.22	3.65	1.23
		BCOR <sub>S</sub> ・T <sub>0</sub>	—	—	—	4.0	3.50	1.14	4.5	3.68	1.22	3.65	1.23
		<sup>3)</sup> BCOR <sub>S</sub> ・B <sub>0</sub>	0.8	1.03	0.78	3.0	2.79	1.08	3.1	2.99	1.04	2.95	1.05
		<sup>3)</sup> BCOR <sub>S</sub> ・B <sub>0</sub> ・T <sub>0</sub>	—	—	—	2.7	2.79	0.97	3.0	2.83	1.06	2.95	1.02
複 筋 梁	石 膏	BGMD <sub>D</sub>	1.2	1.12	1.07	4.5	4.23	1.06	5.8	4.44	1.36	4.42	1.31
		BGMD <sub>D</sub> ・T <sub>0</sub>	—	—	—	4.5	4.23	1.06	5.0	4.44	1.13	4.42	1.13
		BGMR <sub>D</sub>	0.9	1.16	0.78	3.5	3.42	1.02	4.0	3.62	1.10	3.71	1.08
		BGMR <sub>D</sub> ・T <sub>0</sub>	—	—	—	3.8	3.42	1.11	4.3	3.62	1.19	3.71	1.16
		<sup>4)</sup> BGMR <sub>D</sub> ・B <sub>0</sub>	0.8	1.16	0.69	3.8	3.42	1.11	4.2	3.62	1.16	3.71	1.13
		BGMR <sub>D</sub> ・B <sub>0</sub> ・T <sub>0</sub>	—	—	—	3.4	3.42	0.99	4.1	3.62	1.13	3.71	1.11
	コン クリ ート	BCOD <sub>D</sub>	0.8	1.05	0.76	4.8	4.29	1.12	5.7	4.50	1.27	4.44	1.28
		BCOD <sub>D</sub> ・T <sub>0</sub>	—	—	—	4.4	4.29	1.03	5.4	4.50	1.20	4.44	1.22
		BCOR <sub>D</sub>	1.0	1.07	0.93	4.0	3.48	1.15	4.5	3.69	1.22	3.73	1.31
		BCOR <sub>D</sub> ・T <sub>0</sub>	—	—	—	3.6	3.48	1.03	4.5	3.69	1.22	3.73	1.21
		BCOR <sub>D</sub> ・B <sub>0</sub>	0.8	1.07	0.75	3.5	3.48	1.01	3.9	3.69	1.06	3.73	1.05
		BCOR <sub>D</sub> ・B <sub>0</sub> ・T <sub>0</sub>	—	—	—	3.5	3.48	1.01	4.1	3.69	1.11	3.73	1.10

<sup>1)</sup> 弾性剛性:  $\delta = Pl^3/48EI_e$

<sup>2)</sup> 降伏時剛性: 付着力が 0 でない場合は  $e$  関数法により, 付着力が 0 の場合は右図に示すように  $e$  関数法による中立軸を回転中心とし,  $\delta = \phi l/2$  より求めた.

<sup>3)</sup> BGMR<sub>S</sub>・B<sub>0</sub>, BCOR<sub>S</sub>・B<sub>0</sub>, BCOR<sub>S</sub>・B<sub>0</sub>・T<sub>0</sub> は SR 24, 他は SR 30

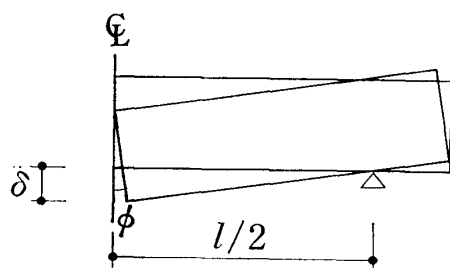
<sup>4)</sup> BGMR<sub>D</sub>・B<sub>0</sub> は試験前に亀裂が見られたため 0.8 ton の値である.



梁の実験結果と計算結果

beam specimens with different bond properties.

剪断終局荷重 (ton)		<sup>1)</sup> 弾性剛性 ( $\times 10^{-2}$ cm/ton)		<sup>2)</sup> 降伏時剛性 ( $\times 10^{-2}$ cm/ton)				試 験 体	
計算	実/計	実験	計算	実/計	実験	計算	実/計		
5.35	1.08	0.80	1.95	0.41	5.13	4.35	1.18	BGMD <sub>S</sub>	石膏
5.35	1.08	—	—	—	5.56	4.35	1.28	BGMD <sub>S</sub> •T <sub>0</sub>	
—	—	1.75	1.92	0.91	5.29	5.24	1.01	BGMR <sub>S</sub>	
—	—	—	—	—	5.54	5.24	1.06	BGMR <sub>S</sub> •T <sub>0</sub>	
—	—	1.83	1.92	0.95	10.48	10.25	1.02	<sup>3)</sup> BGMR <sub>S</sub> •B <sub>0</sub>	
—	—	—	—	—	12.36	10.64	1.16	BGMR <sub>S</sub> •B <sub>0</sub> •T <sub>0</sub>	
5.58	1.02	0.83	1.29	0.64	5.00	3.97	1.26	BCOD <sub>S</sub>	コンクリート
5.58	1.02	—	—	—	6.62	3.97	1.67	BCOD <sub>S</sub> •T <sub>0</sub>	
—	—	1.60	1.28	1.25	4.66	4.29	1.09	BCOR <sub>S</sub>	
—	—	—	—	—	5.38	4.29	1.25	BCOR <sub>S</sub> •T <sub>0</sub>	
—	—	1.00	1.28	0.78	9.00	10.60	0.85	<sup>3)</sup> BCOR <sub>S</sub> •B <sub>0</sub>	
—	—	—	—	—	9.40	10.60	0.89	<sup>3)</sup> BCOR <sub>S</sub> •B <sub>0</sub> •T <sub>0</sub>	
5.35	1.08	1.38	1.73	1.10	5.24	4.49	1.17	BGMD <sub>D</sub>	石膏
5.35	0.93	—	—	—	4.96	4.49	1.10	BGMD <sub>D</sub> •T <sub>0</sub>	
—	—	1.25	1.68	0.74	4.37	4.59	0.95	BGMR <sub>D</sub>	
—	—	—	—	—	5.37	4.59	1.17	BGMR <sub>D</sub> •T <sub>0</sub>	
—	—	4.17	1.68	2.48	10.27	10.35	0.99	<sup>4)</sup> BGMR <sub>D</sub> •B <sub>0</sub>	
—	—	—	—	—	11.91	10.35	1.15	BGMR <sub>D</sub> •B <sub>0</sub> •T <sub>0</sub>	
5.58	1.02	1.33	1.19	1.12	5.24	3.88	1.35	BCOD <sub>D</sub>	コンクリート
5.58	0.97	—	—	—	4.61	3.88	1.19	BCOD <sub>D</sub> •T <sub>0</sub>	
—	—	2.20	1.17	1.88	4.13	3.60	1.15	BCOR <sub>D</sub>	
—	—	—	—	—	4.29	3.60	1.20	BCOR <sub>D</sub> •T <sub>0</sub>	
—	—	1.17	1.17	1.00	10.91	10.29	1.06	BCOR <sub>D</sub> •B <sub>0</sub>	
—	—	—	—	—	13.43	10.29	1.31	BCOR <sub>D</sub> •B <sub>0</sub> •T <sub>0</sub>	



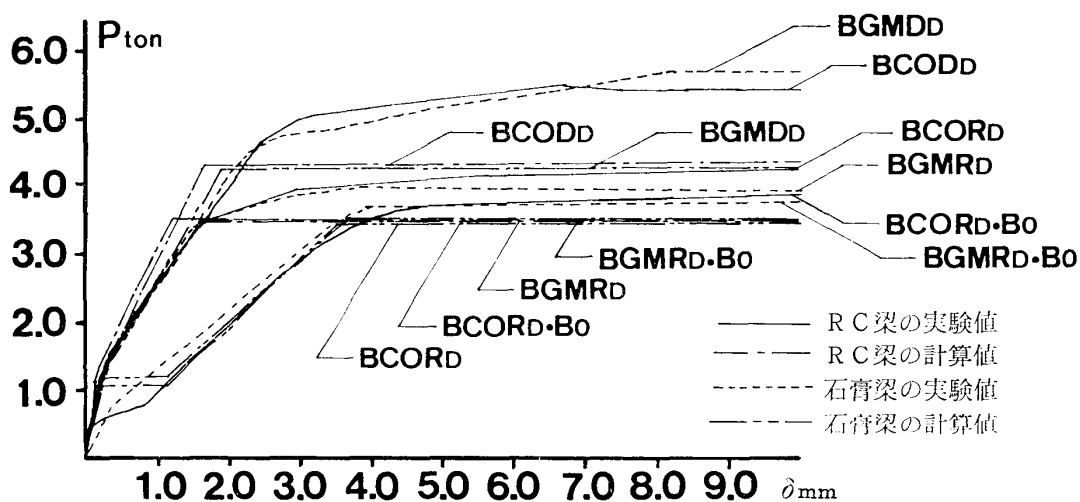


図 5.17 付着力を変化させた梁の  $P$ - $\delta$  曲線 (複筋梁)

Fig. 5.17. Load-deflection curve of specimens with different bond property.

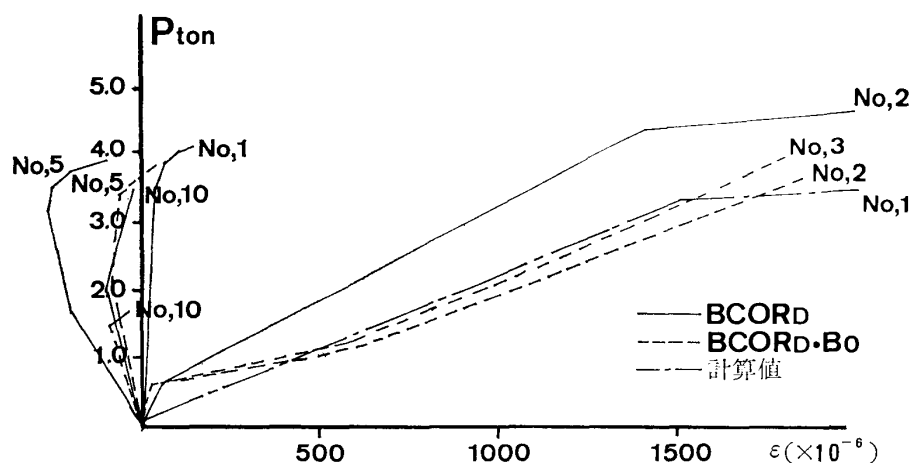


図 5.18 付着力を変化させた梁の  $P$ - $\epsilon$  曲線

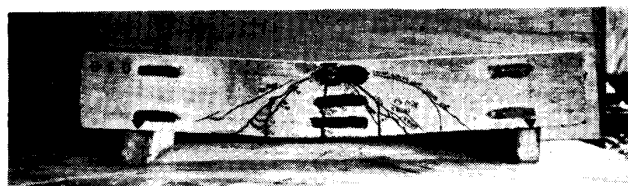
Fig. 5.18. Load-strain curve of reinforcing bar of specimen with different bond property.

#### (6) 試験体写真

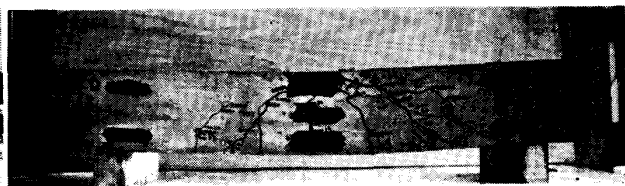
実験終了後の写真を図 5.19 (a)~(x) に示す。写真で見ると、付着力 0 の場合は、1 本の亀裂が生じて、応力が載荷点に集中し、同荷重の状態では変形は進行するが急激な破壊はなかった。

#### 5.5. 結 び

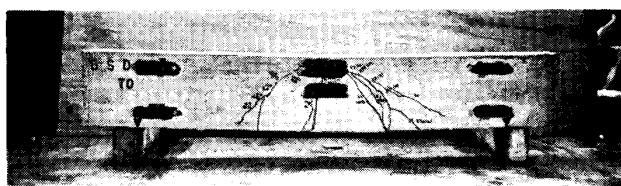
3 種類の梁の実験から構造部材としての石膏の概要を知り得ることができた。すなわち、石膏は軽量骨材との複合材料として使用したとき、よりその性能が改良され、力学的特性は



(a)  $BGMD_s$



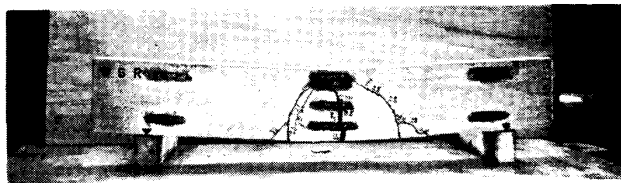
(g)  $BCOD_s$



(b)  $BGMD_s \cdot T_0$



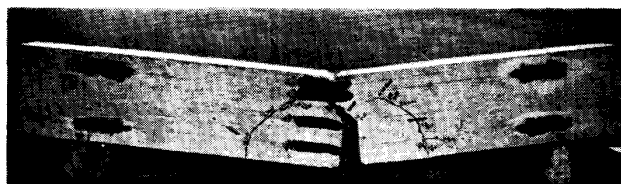
(h)  $BCOD_s \cdot T_0$



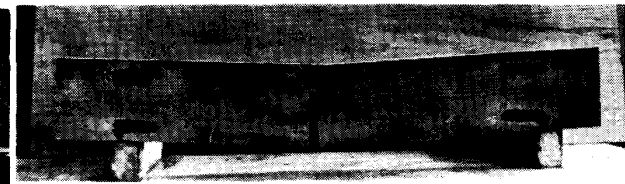
(c)  $BGMR_s$



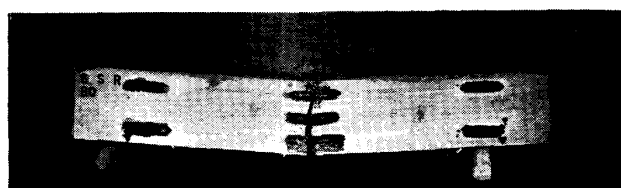
(i)  $BCOR_s$



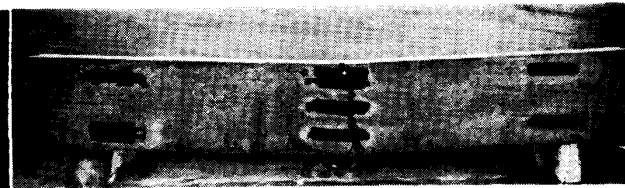
(d)  $BGMR_s \cdot T_0$



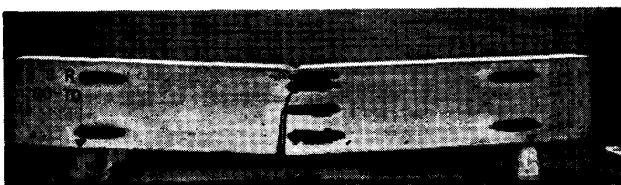
(j)  $BCOR_s \cdot T_0$



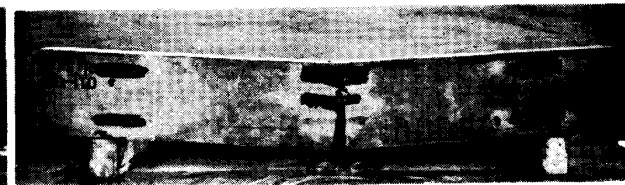
(e)  $BGMR_s \cdot B_0$



(k)  $BCOR_s \cdot B_0$



(f)  $BGMR_s \cdot B_0 \cdot T_0$



(l)  $BCOR_s \cdot B_0 \cdot T_0$

Fig. 5.19.

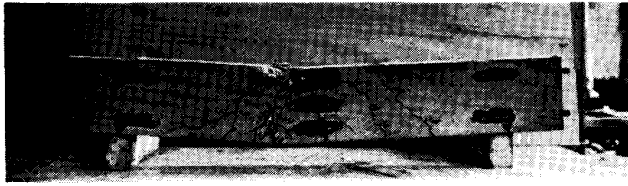
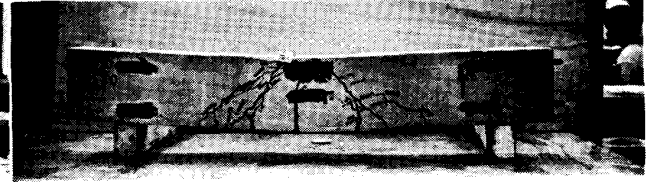
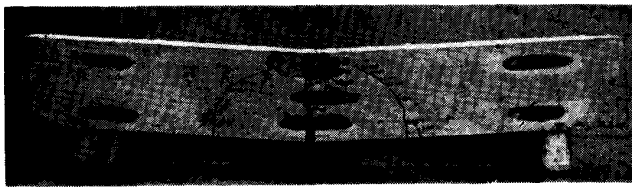
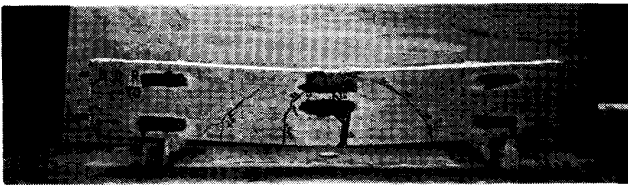
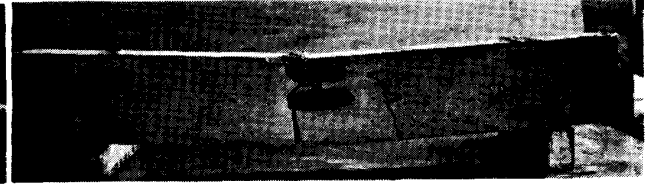
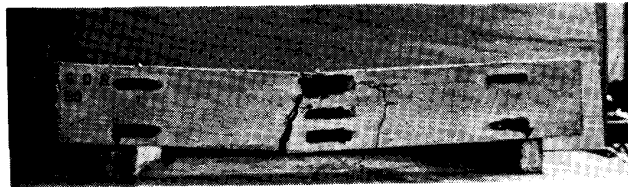
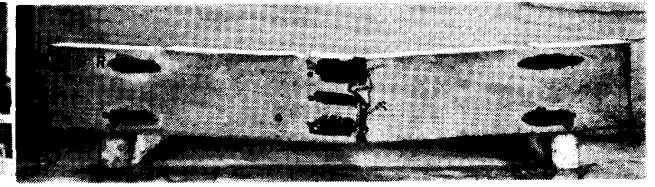
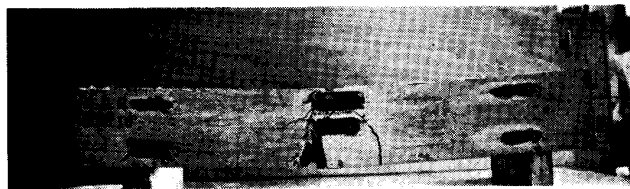
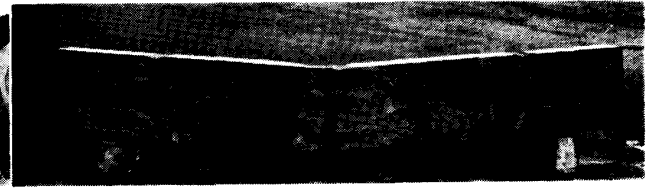
(m)  $BGMD_D$ (s)  $BCOD_D$ (n)  $BGMD_D \cdot T_0$ (t)  $BCOD_D \cdot T_0$ (o)  $BGMR_D$ (u)  $BCOR_D$ (p)  $BGMR_D \cdot T_0$ (v)  $BCOR_D \cdot T_0$ (q)  $BGMR_D \cdot B_0$ (w)  $BCOR_D \cdot B_0$ (r)  $BGMR_D \cdot B_0 \cdot T_0$ (x)  $BCOR_D \cdot B_0 \cdot T_0$ 

図 5.19 付着力を変化させた梁の実験終了後の写真

Fig. 5.19. Photographs of specimens with different bond property after test.

補強軽量石膏梁が補強石膏単体梁より優れている。また、鉄筋補強石膏部材においては、丸鋼を使用したものより、異形鉄筋を使用したものの方が、一体構造としての機能をよく発揮し、常温養生部材と低温養生部材の性能には、ほとんど差は見られなかった。

実大梁の曲げ強度試験では、石膏梁、RC 梁ともその性能に大きな違いがなく、力学的性能は近似した。

付着力を変化させた梁の試験では、石膏梁および RC 梁の強度、変形および破壊性状はほとんど同じであり、付着力を 0 とした場合のみ、両者ともに変形量が大きくなるが、強度には変化のないことが確認された。

## 6. 柱の強度試験

### 6.1. 概 要

試験体の形状、寸法、全主筋比、剪断スパン比、帯筋比等は同一とし、軸力の影響を主要因とした正負繰り返し水平力を受ける柱の諸強度、変形および破壊性状を検討することを目的とし、既往の計算式および有限要素法による解析結果と比較検討した。

なお、軸力の決定は広沢・柳沢 (1973) の調査結果によった。

### 6.2. 実験の概要と方法

#### 6.2.1. 試験体

試験体の形状、寸法および試験体番号を図 6.1 および表 6.1 に示す。試験体番号の記号中  $N$  のサフィックス  $N_0$ ,  $N_{10}$  および  $N_{20}$  は軸力の大きさを表す。

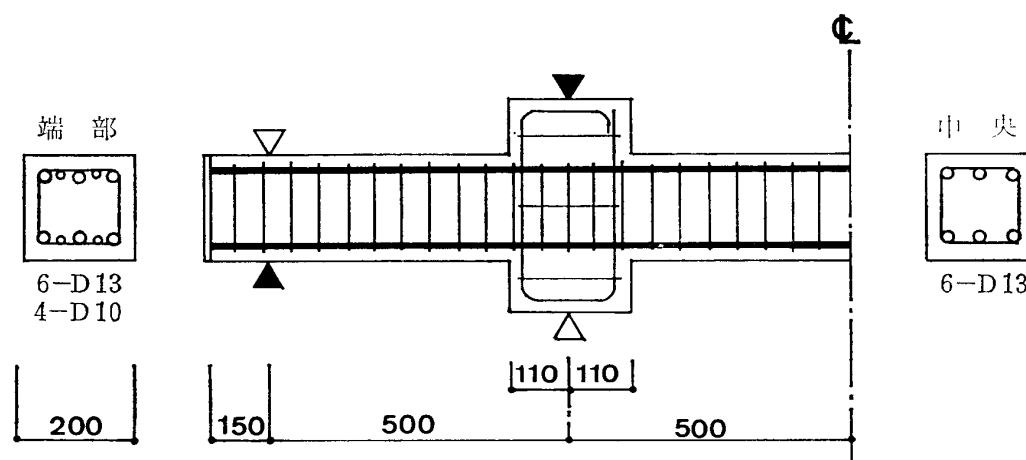


図 6.1 柱の試験体形状 (単位: mm)

Fig. 6.1. Details of column specimen.

表 6.1 柱の試験体番号

Table 6.1. Identification of column specimens.

柱	試験体番号	$N/A$ (kg/cm <sup>2</sup> )
石膏柱	CGMD・ $N_0$	0
	CGMD・ $N_{10}$	25
	CGMD・ $N_{20}$	50
RC柱	CCOD・ $N_0$	0
	CCOD・ $N_{10}$	25
	CCOD・ $N_{20}$	50

各々の試験体の鉄筋は、同一に配筋されているが、中央部で破壊させるため、端部は、6-D 13, 4-D 10 ( $P_g=2.6\%$ )、中央部は 6-D 13 ( $P_g=1.9\%$ ) とし、主筋端部は定着させるため厚さ 19 mm の鉄板に溶接した。

また、帯筋は端部において 2-4  $\phi$ , 5.6 cm @ ( $P_w=0.22\%$ )、中央部は 2-4  $\phi$ , 6.0 cm @ ( $P_w=0.2\%$ ) として主筋に溶接した。

表 6.2 柱の調合設計

Table 6.2. Mixture proportions of column specimens.

	水 (l/m <sup>3</sup> )	石膏またはセメント (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	打込温度 (°C)	スランプ (cm)	その他
軽量石膏	238	595	467	700	17	15±3	硬化剤
コンクリート	193	322	767	1040	28	17±1.5	—

表 6.3 柱の石膏およびコンクリートの諸性能

Table 6.3. Mechanical properties of column specimens of gypsum and concrete.

	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_{1/3}$ ( $\times 10^3$ kg/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比 ( $\nu$ )
軽量石膏	233	24.6	1.33	0.20
コンクリート	256	28.1	2.83	0.19

表 6.4 柱の鉄筋の諸性能

Table 6.4. Mechanical properties of reinforcing bars of column specimens.

	降伏応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ( $\times 10^3$ kg/cm <sup>2</sup> )	伸び率 (%)
D13	3470	5180	1.85	21.60
4 $\phi$	4960	5420	1.71	4.22

調合設計を表 6.2 に、使用材料の諸性能を表 6.3, 6.4 に示す。

石膏の打ち込みは、水、石膏および骨材を冷凍庫に保管し、十分に冷やし、打設温度を下げるため、練り混ぜの直前に取り出し打設した。打設温度は  $17^{\circ}\text{C}$  であった。

### 6.2.2. 実験の装置と方法

実験装置を図 6.2 に示す。加力は大野式加力方法により、逆対称正負繰返し载荷とし、水平载荷は 200 ton アムスラーを 50 ton セットで行い、軸力は 50 ton ジャッキを用い、実験中設定した軸力が常に一定になるよう調整した。軸力の検出はロードセルによった。加力計画を図 6.3 に示す。

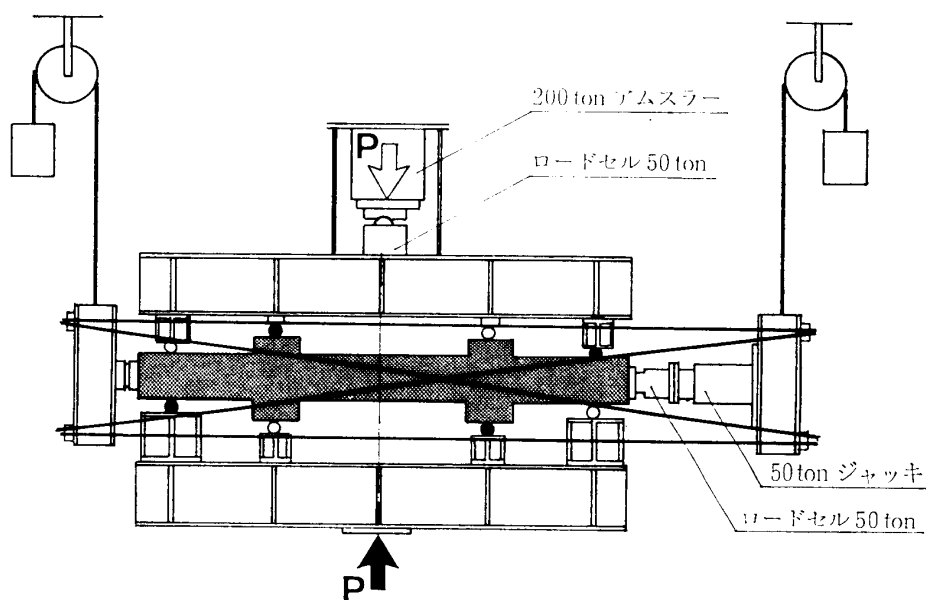


図 6.2 柱の実験装置

Fig. 6.2. Test setup for column specimen.

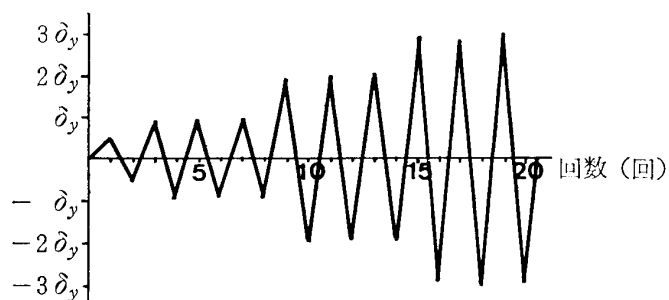


図 6.3 柱の加力計画

Fig. 6.3. Loading excursion for beam specimen.

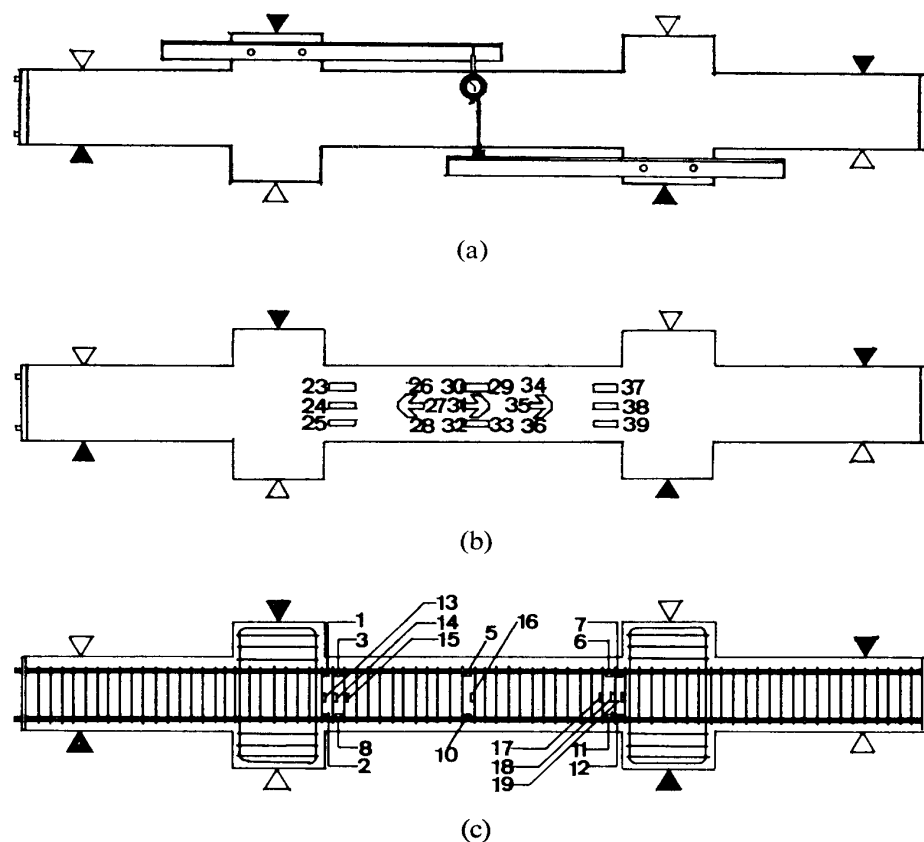


図 6.4 柱の測定位置

(a) ダイヤルゲージ, (b) ストレインゲージ (試験体表面),  
(c) ストレインゲージ (鉄筋)

Fig. 6.4. Measuring points of column specimens. (a) Positions of dial gauges attached to specimen. (b) Positions of wire strain gauges attached to the surface of specimens. (c) Positions of wire strain gauges attached to the reinforcing bars.

変位と歪の測定は、ダイヤルゲージとストレインゲージを用い、それぞれの測定個所を図 6.4 (a), (b), (c) に示す。

### 6.3. 実験結果と考察

#### 6.3.1. 実験結果と計算値の比較

各試験体について実験結果と計算結果の一覧を表 6.5 に示す。なお、この実験値は柱に加わる剪断力の 3 倍の値である。

各試験体中央 (図 6.4 (a) ダイヤルゲージ位置) の荷重-変位曲線を図 6.5 に、主筋および帯筋の荷重-歪曲線を図 6.6, 6.7 に示す (図 6.4 (c) ストレインゲージ位置 No. 1 および No. 13)。



表 6.5 柱の実験結果と計算結果  
 Table 6.5. Test results and predicted ones of column specimens.

試 験 体		CGMD			CCOD		
軸 方 向 力 (ton)		0	10	20	0	10	20
初 亀 裂 荷 重 (ton)	実験値	4.50	8.50	11.00	4.95	9.00	10.00
	計算値	3.90	6.47	9.03	3.80	6.05	8.62
	実 / 計	1.15	1.31	1.22	1.30	1.49	1.16
曲げ剪断亀裂荷重 (ton)	実験値	12.00	13.00	15.00	8.00	14.05	17.00
	計算値	9.10	12.37	15.65	8.77	12.05	15.32
	実 / 計	1.32	1.05	0.96	0.91	1.20	1.11
剪断亀裂荷重 (ton)	実験値	14.00	16.00	17.00	13.00	15.00	22.00
	計算値	8.05	8.05	8.05	10.38	10.38	10.38
	実 / 計	1.71	1.99	2.11	1.25	1.45	2.12
降 伏 荷 重 (ton)	実験値	15.00	22.00	27.00	15.50	20.00	24.00
	計算値	13.78	22.38	27.67	13.78	20.73	26.17
	実 / 計	1.09	0.98	0.98	1.12	0.96	0.92
曲 げ 終 局 荷 重 (ton)	実験値	17.20	22.50	27.60	17.50	24.05	25.50
	計算値	18.32	20.54	22.77	18.86	21.09	23.31
	実 / 計	0.94	1.10	1.21	0.93	1.16	1.09
初 期 剛 性 ( $\times 10^3$ ton/cm)	実験値	127	130	118	123	198	170
	計算値	189	189	189	343	343	343
	実 / 計	0.67	0.69	0.62	0.36	0.58	0.50
降 伏 時 剛 性 ( $\times 10^3$ ton/cm)	実験値	42.40	46.50	40.30	34.90	36.20	34.80
	計算値	46.70	51.50	56.30	56.40	64.40	72.30
	実 / 計	0.91	0.90	0.72	0.62	0.56	0.48
降 伏 時 変 形 (mm)		3.60	4.80	6.80	4.50	5.60	7.00
降 伏 時 部 材 角 ( $\times 10^{-3}$ )		4.60	6.15	8.71	5.77	7.18	8.97
限 界 変 形 (mm)		17.20	18.00	12.80	14.60	12.20	12.00
限 界 部 材 角 ( $\times 10^{-3}$ )		22.05	23.08	16.41	18.72	15.64	15.38
塑 性 率		4.78	3.75	1.88	3.42	2.18	1.71

### 6.3.2. 有限要素法による解析と仮定

柱の構成要素を、石膏またはコンクリート要素、鉄筋要素およびボンド要素からなるものとし、次の仮定に基づいて各要素の剛性マトリックスを求め増分法で解析した。

#### (1) 石膏またはコンクリート要素

要素はすべて3角形要素とし、石膏またはコンクリートの応力-歪曲線は圧縮側は tri-linear, 引張側は弾性とし、剛性マトリックスは弾性時は等方弾性体、降伏時は山田 (1970) の式を

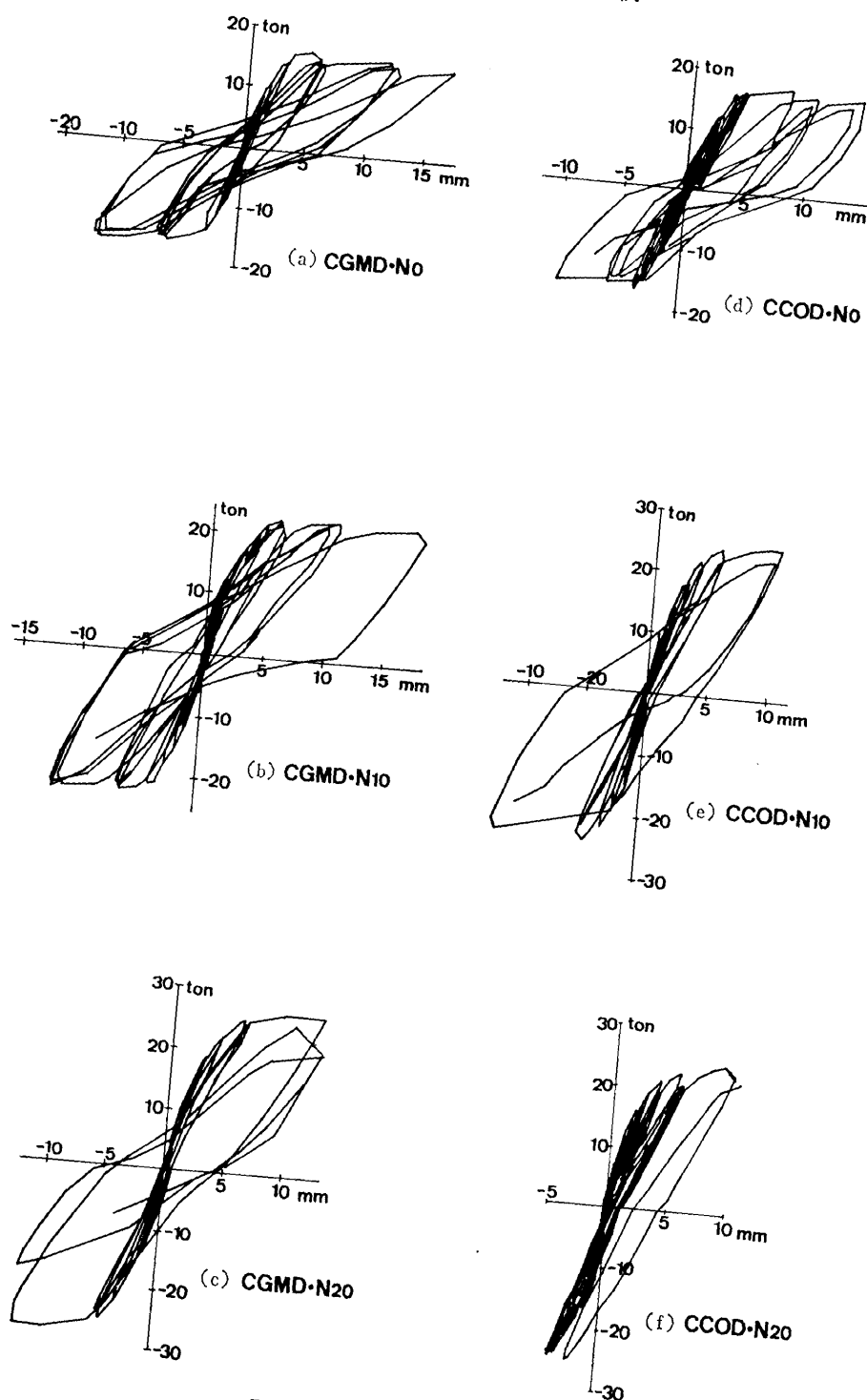


図 6.5 柱の  $P-\delta$  曲線  
 Fig. 6.5. Load-deflection curve of column specimens.

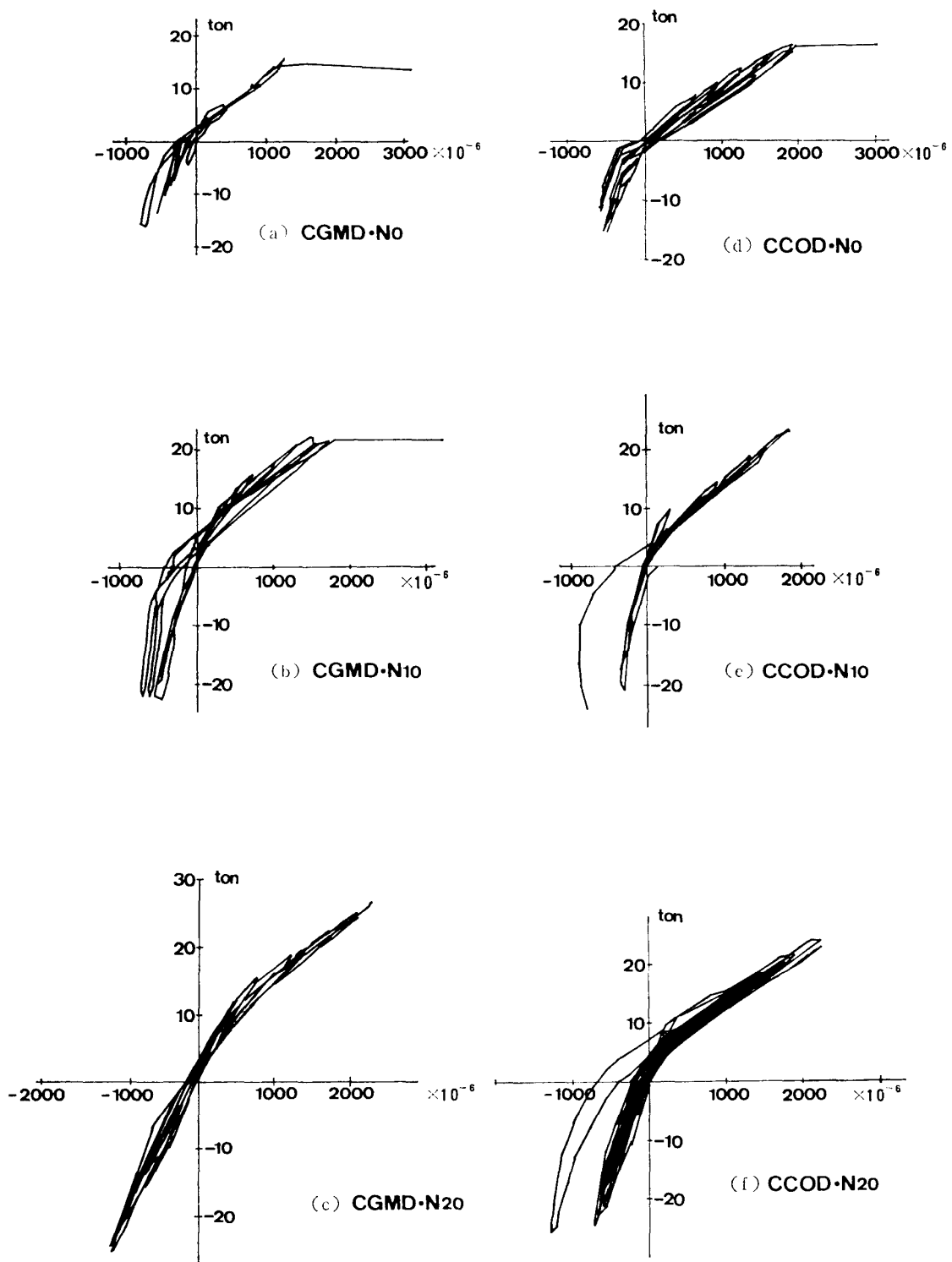


図 6.6 柱の  $P-\epsilon$  曲線 (No. 1).

Fig. 6.6. Load-strain curve (at the position of the wire strain gauge of reinforcing bar for column specimen No. 1).

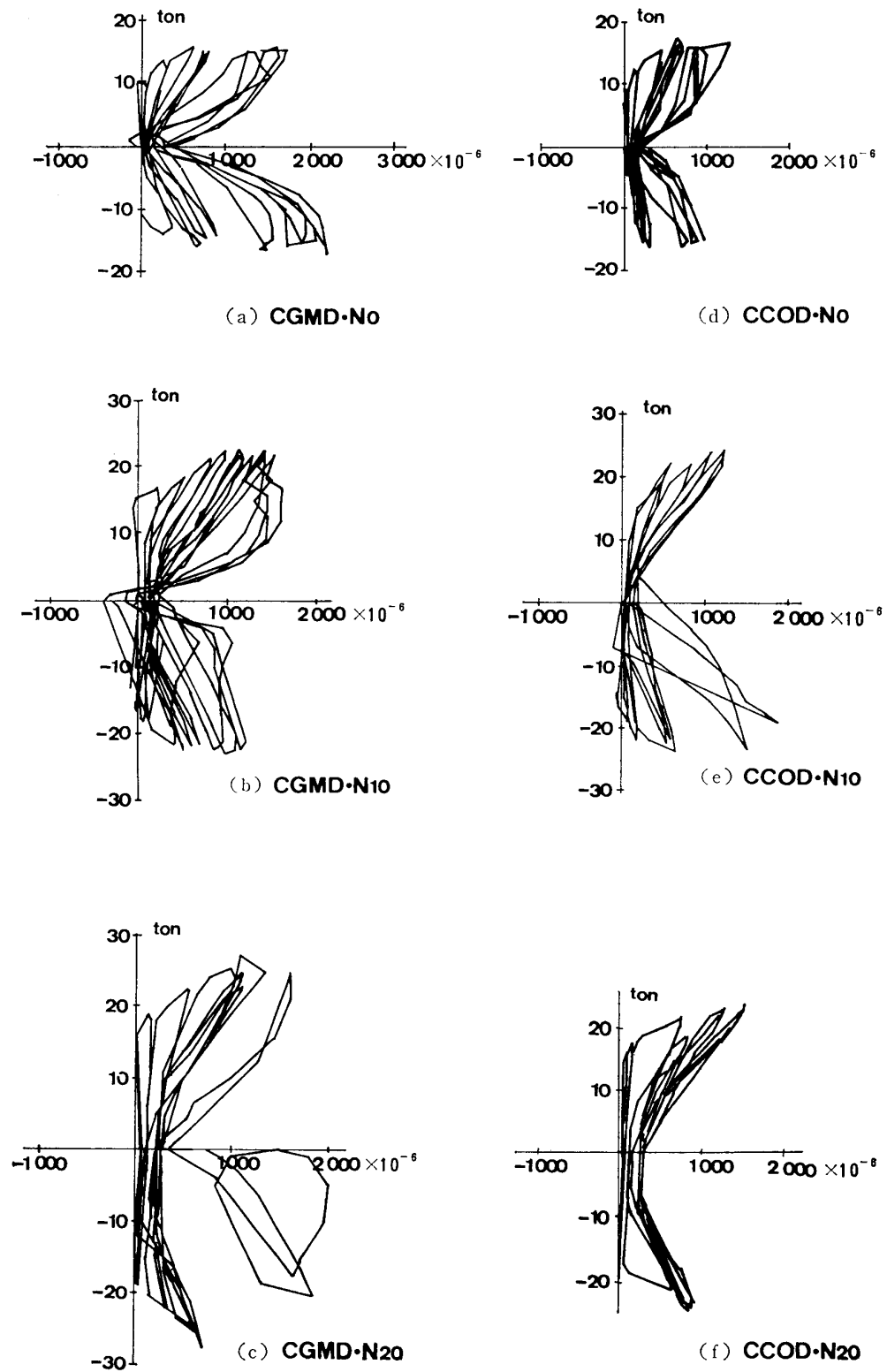


図 6.7 柱の  $P-\epsilon$  曲線 (No. 13)

Fig. 6.7. Load-strain curve (at the position of the wire strain gauge of reinforcing bar for column specimen No. 13).

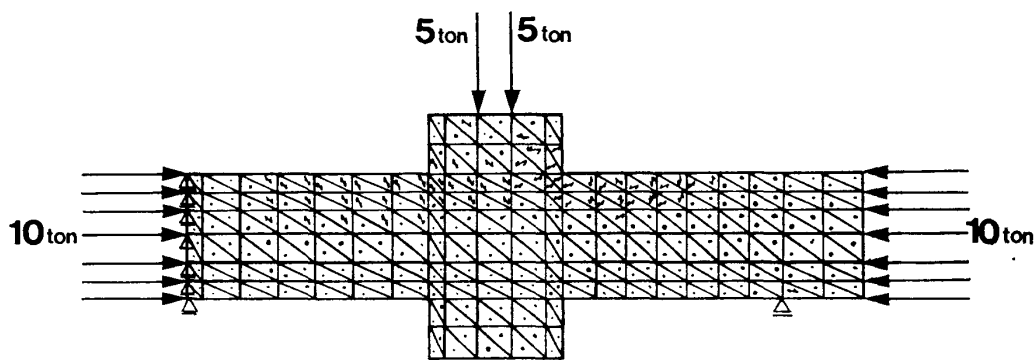
用いた。なお、降伏条件式は、Drucker と Prager の降伏関数を用いた。また、脆性破壊時は脆性破壊面と直角方向のヤング係数を 0 とする黒正・滝口(1971)の直交異方弾性体とし、亀裂により解放すべき要素内応力を等価な節点力に置換した。2 方向の亀裂時の剛性マトリックスは 0 とした。

(2) 鉄筋要素

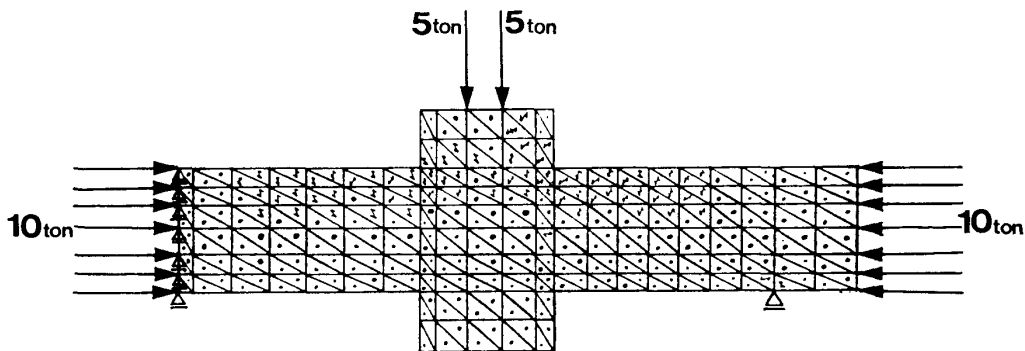
鉄筋は軸方向のみ剛性を有する線材要素とした。

(3) ボンド要素

付着に関しては、NGO and SCORDELIS (1967) の鉄筋と石膏またはコンクリートをばねで結ぶ大きさ 0 のばね要素とした。



(a) CGMD・N10



(b) CCOD・N10

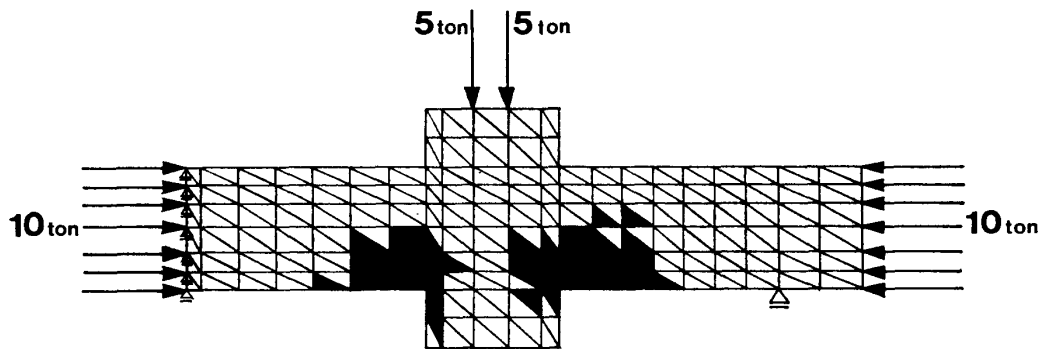
図 6.8 石膏およびコンクリート柱の有限要素法による解析

Fig. 6.8. Principal stresses of reinforced gypsum and concrete columns calculated by Finite Element Method.

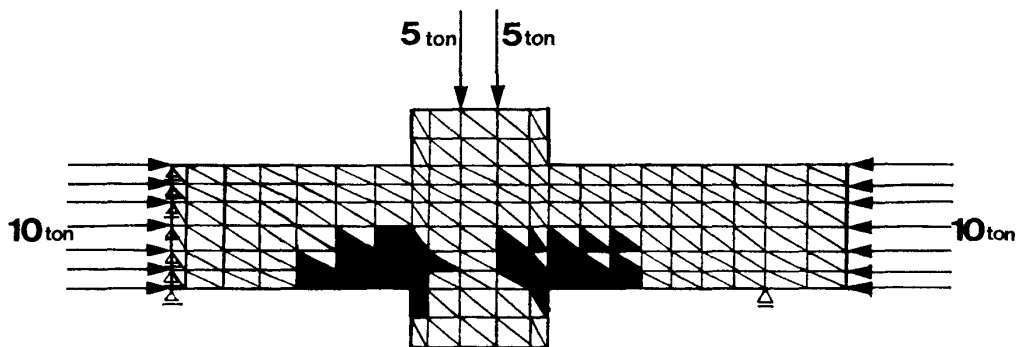
これらの要素を重ね合わせて全体の剛性マトリックスを求め、連立方程式を解き、各段階での変位増分、歪増分、応力増分量を加えることによって変位、歪、応力を求めた。なお、ここで用いた式の誘導は別の機会に報告する。

有限要素法による解析モデルは図 6.8, 6.9 に示すように試験体の右半分を用い、石膏またはコンクリート要素は、これらの図に示す 3 角形要素とし、鉄筋要素は主筋、帯筋とも、石膏またはコンクリート要素の各節点間とした。

解析は石膏柱および RC 柱とも、軸力 10 ton についてのみ行い、水平増分荷重を 1 ton とした。軸力は図 6.8 に示すように面積に比例して分散させ、水平荷重は梁部分で  $2/3P$ 、柱支点に  $1/3P$  を加えた。ここに  $P$  は図 6.2 の値である。



(a) CGMD・N10



(b) CCOD・N10

図 6.9 石膏およびコンクリート柱の有限要素法による亀裂個所  
Fig. 6.9. Cracked elements of reinforced concrete and gypsum columns calculated by F.E.M.

初亀裂荷重は、RC 柱の場合実験値より 11% 低く、石膏柱は 6% 程度低い値であった。

曲げ剪断亀裂荷重は石膏柱、RC 柱とも、3% 程度高い値であった。なお、剪断亀裂は顕著に現れていなかった。

図 6.8, 6.9 は実験結果から試験体に曲げ剪断亀裂と剪断亀裂が発生しはじめるころの値  $P=15 \text{ ton}$  を水平載荷荷重としたときの主応力図および亀裂図である。この解析の場合、剛性は実験値より高くなった。

### 6.3.3. 破壊性状

図 6.10 (a)~(f) は各試験体の実験終了後の破壊の状態である。

各試験体の亀裂発生過程は、初めに曲げ亀裂が脚部に生じ、その後曲げ剪断亀裂が、次に剪断亀裂が生じ、荷重の増加に伴い、曲げによる亀裂幅はあまり拡大せず、写真で見ると、剪断亀裂が顕著に現れ破壊した。しかし、 $CCOD \cdot N_0$  は図 6.10 (d) のように、付着亀裂が進展し、コンクリートと鉄筋が完全に剥離して破壊した。各試験体の破壊機構を表

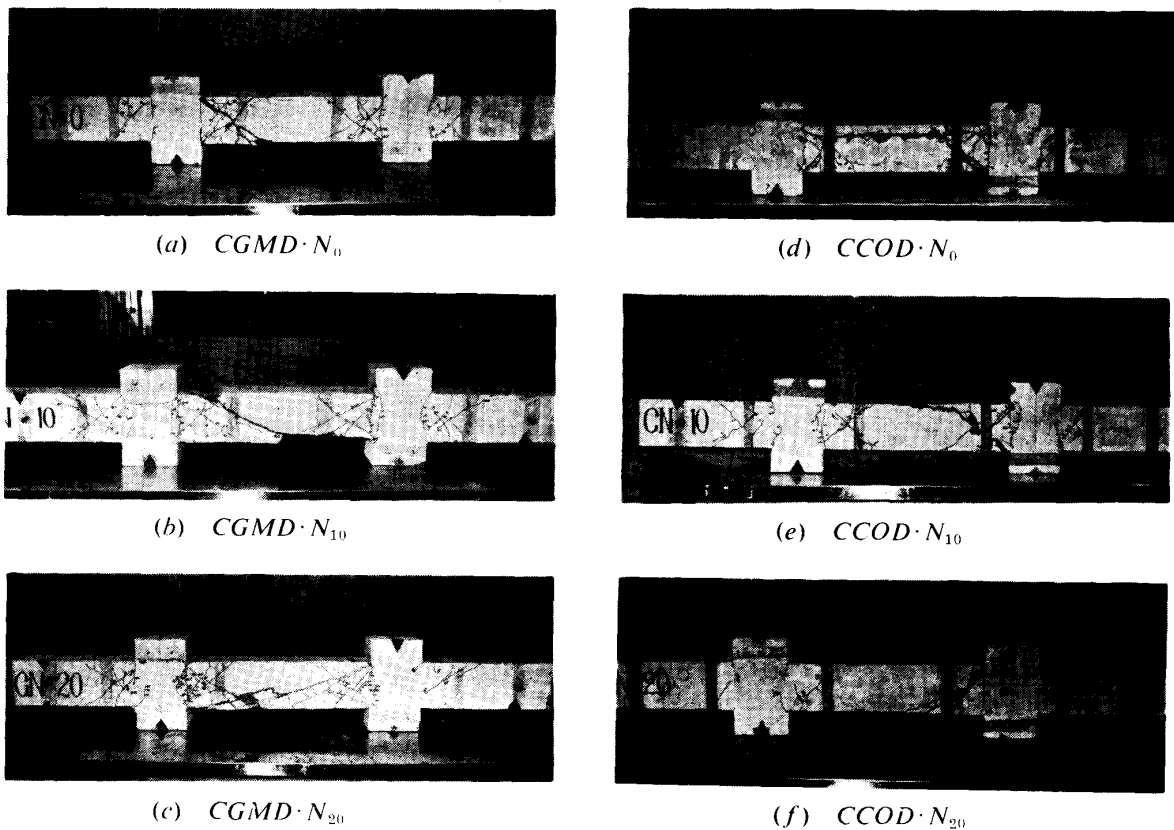


図 6.10 柱の実験終了後の写真  
Fig. 6.10. Photographs of column after test.

6.6 に示す。

また、帯筋は図 6.11 で見るように、主筋近傍で切断された。帯筋の切断個所および本数は、脚部より 2~4 本目で試験体の左右とも 2~3 本である。なお、斜張力破壊をおこした BGMD・ $N_{10}$  は中央部 (4~6 本目) で切断した。

表 6.6 柱の破壊機構

Table 6.6. Failure mechanisms for column specimens.

$N$ (ton)	CGMD	CCOD
0	Shear tension failure	Bond split failure
10	Diagonal tension failure	Shear tension failure
20	Diagonal tension failure	Shear tension failure

#### 6.3.4. 考察

石膏柱と RC 柱の実験値の比を表 6.7 に示す。

表 6.5 に示すように、軸力の増加に伴い、すべての諸荷重が増加した。

##### (1) 曲げ初亀裂荷重

実験値と計算値を比較すると、各試験体とも 15~49% の範囲で実験値が高い値を示した。なお、石膏柱と RC 柱の実験値はほぼ同じような傾向である。

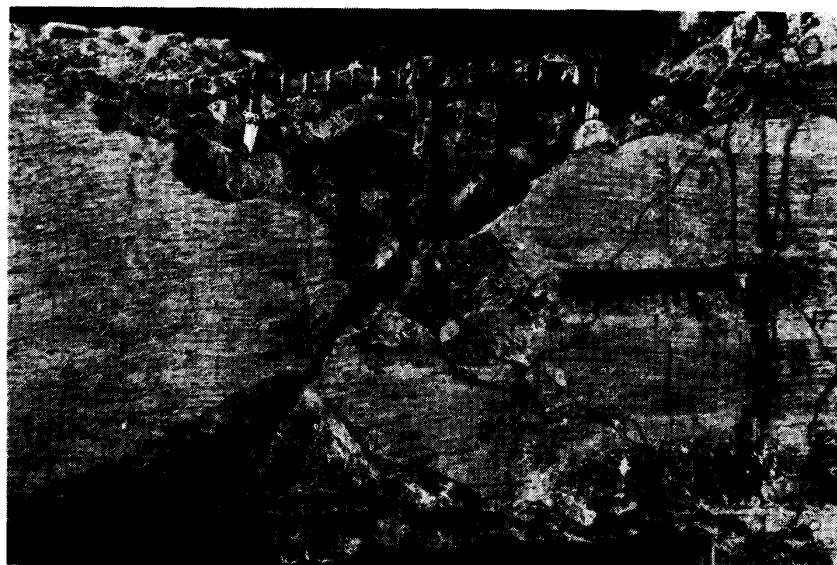


図 6.11 剪断引張破壊および帯筋の切断

Fig. 6.11. Shear tension and broken hoop.



表 6.7 石膏柱と RC 柱の実験値の比

Table 6.7. Ratio of the test values of gypsum columns to those of reinforced concrete ones.

軸 力 (ton)	0	10	20
初 亀 裂 荷 重	0.91	0.94	1.10
曲 げ 剪 断 亀 裂 荷 重	1.50	0.90	0.88
剪 断 亀 裂 荷 重	1.08	1.07	0.77
降 伏 荷 重	0.97	1.10	1.13
最 大 耐 力	0.98	0.92	1.18
初 期 剛 性	1.03	0.66	0.69
降 伏 時 剛 性	1.21	1.28	0.16

石膏柱/RC 柱

## (2) 曲げ剪断亀裂荷重

実験値と計算値は比較的よく一致しており、全般的に実験値と計算値の比較では、軸力 0 ton で 10% 程度 RC 柱の方が高い。

## (3) 剪断亀裂荷重

実験値と計算値の比較では、実験値が高い値を示し、特に軸力が 20 ton では 2 倍以上の値を示した。

## (4) 曲げ降伏荷重

主筋が降伏歪に達した時の荷重で、実験値と計算値の比較では軸力 0 ton の時 10% 程度高く、10 ton, 20 ton では逆に 0.02%~0.08% の範囲で低くなるが、計算値とよく一致した。また、軸力が 0 ton の時、石膏柱と RC 柱を比較するとほとんど同じ曲げ降伏耐力を示したが、軸力を加えると耐力は石膏柱の方が約 20% 程度上昇した。

## (5) 帯筋の荷重-歪曲線

亀裂発生以前はほとんど歪は生じないが、亀裂発生後は、図 6.7 に示すように正負載荷時とも引張歪が生じ、載荷回数の増加に伴い、残留歪も増加する。

## (6) 初期剛性

石膏柱、RC 柱とも実験値が低い値を示し、石膏柱と RC 柱の計算値は、RC 柱が約 1.8 倍であり、実験値は軸力 0 ton では同程度であるが、10 ton, 20 ton では約 1.5 倍となった。

## (7) 降伏時剛性

日本建築学会計算規準 (1975) から次式の剛性低下率を用いて求めた。

$$\alpha_y = \left( 0.043 + 1.64 n P_t + 0.043 \frac{a}{D} + 0.33 y_0 \right) \left( \frac{d}{D} \right)^2, \quad (6.1)$$

ここに,

$$y_0 = \frac{N}{b D F_c}, \quad a = \frac{M}{Q}.$$

降伏時剛性の計算値は，各軸力段階で RC 柱の方が約 25% ほど高いが，実験値は逆に 20% 前後石膏の方が高くなっている。

### (8) 限界変形

CCOD・ $N_{10}$ ，CGMD・ $N_{20}$ ，CCOD・ $N_{20}$  の場合は，12 mm 程度で塑性率も 2 前後であるが CGMD・ $N_0$ ，CCOD・ $N_0$ ，CGMD・ $N_{10}$  は塑性率が 3 以上となった。また，石膏柱と RC 柱の比較では，石膏柱の方が限界変形量が勝っている。軸力 0 の場合，RC 柱は石膏柱の 0.85 倍と低くなった。これは RC 柱に付着割裂亀裂が顕著に現れたためと思われる。

軸力の変化による塑性率は，軸力の増加に伴い減少する。

## 7. ラーメンの強度試験

### 7.1. 概 要

試験体の形状，寸法，柱主筋および軸力を一定とし，剪断補強筋および梁主筋をパラメーターとする，1 層 1 スパン矩形ラーメンの多数回正負繰り返し水平加力実験を行い，ラーメンとしての，その耐力，挙動および破壊機構を比較検討することを目的とし，特にその保有耐力について考察した。

本実験で想定した崩壊機構は，層崩壊形および梁崩壊形で，前者が，石膏ラーメン，RC ラーメンとも各 3 体（曲げ圧縮破壊形各 1 体，剪断破壊形各 2 体），後者を各 1 体計 8 体の試験体を作成した。

### 7.2. 実験の概要と方法

#### 7.2.1. 試験体

試験体の形状，寸法を図 7.1 に，試験体番号およびその配筋を表 7.1 に示す。

なお，試験体番号の記号中，5 桁目以下の  $P_w 02$ ， $P_w 06$ ， $P_w 12$  は帯筋比が各々約 0.2%，0.6%，1.2%，および  $B_y$  は梁崩壊形を意味している。

調合設計を表 7.2 に，使用材料の諸性能を表 7.3，7.4 に，付着応力度を表 7.5 に示す。

練り混ぜは石膏のみジェットミキサーを使用し，打ち込み温度を 23°C 以下に保つため，石膏・骨材とも十分に冷やし，氷を用いて打ち込み温度を下げるようにした。

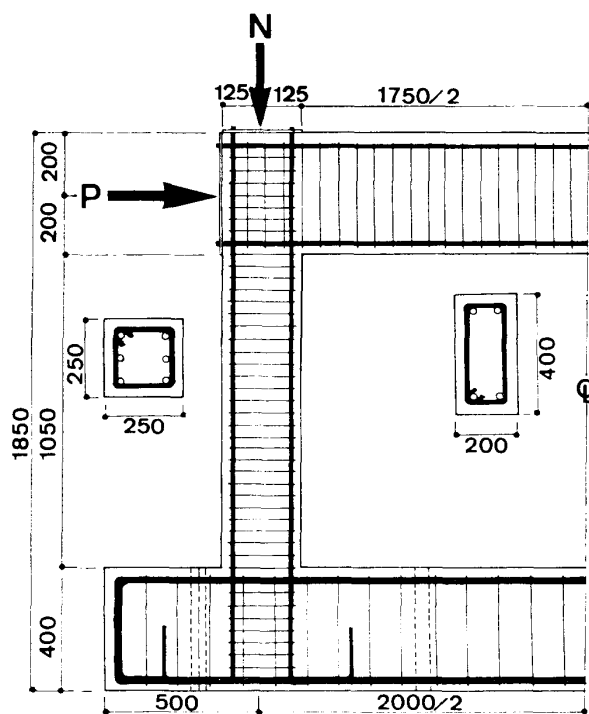


図 7.1 ラーメンの試験体形状 (単位: mm)  
Fig. 7.1. Details of framed specimen.

表 7.1 ラーメンの試験体番号および配筋  
Table 7.1. Identification and bar arrangements of framed specimens.

試 験 体 番 号	主 筋		剪 断 補 強 筋			
	柱		梁		柱	
	$a_t=a_c$ (cm <sup>2</sup> ), $P_t$ (%)	$a_t=a_c$ (cm <sup>2</sup> ), $P_t$ (%)	$a_w$ (cm <sup>2</sup> )	$x$ (cm) $P_w$ (%)	$a_w$ (cm <sup>2</sup> )	$x$ (cm) $P_w$ (%)
FGMD・ $P_w$ 02	3-D16 5.97 0.95	2-D22 7.74 1.08	2-6 $\phi$ 0.56	11.0 0.20	2-D10 1.43	5.83 1.23
FGMD・ $P_w$ 06	"	"	2-D10 1.43	8.57 0.65	"	"
FGMD・ $P_w$ 12	"	"	2-D10 1.43	4.57 1.25	"	"
FCOD・ $P_w$ 02	"	"	2-6 $\phi$ 0.56	11.0 0.20	"	"
FCOD・ $P_w$ 06	"	"	2-D10 1.43	8.75 0.65	"	"
FCOD・ $P_w$ 12	"	"	2-D10 1.43	4.57 1.25	"	"
FGMD・ $B_y$	"	2-D13 2.54 0.35	2-D10 1.43	4.57 1.25	"	"
FCOD・ $B_y$	"	"	2-D10 1.43	4.57 1.25	"	"

表 7.2 ラーメンの調合設計

Table 7.2. Mixture proportions of framed specimens.

	スランプ (cm)	水 (l/m <sup>3</sup> )	石膏またはセメント (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	添加材/石膏 (%) 混和剤 (%)
軽量石膏	23.0	136	488	484	575	硫酸カリウム 0.7 マイティ 0.4
コンクリート	20.6	175	324	1002	805	0.3

注) 石膏打ち込み時の温度および水、氷の量: 骨材温度 28°C, 打ち込み温度 23°C, 水 195 kg, 氷 80 kg.

表 7.3 ラーメンの石膏およびコンクリートの諸性能

Table 7.3. Mechanical properties of framed specimens of gypsum and concrete.

	養生	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_{1/3}$ ( $\times 10^5$ kg/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比 ( $\nu$ )
軽量石膏	常温	342	29.73	1.37	0.20
	0°C	319	—	1.26	0.19
コンクリート	常温	302	27.60	2.21	0.17

表 7.4 ラーメンの鉄筋の諸性能

Table 7.4. Mechanical properties of reinforcing bars of framed specimens.

	降伏点応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ( $\times 10^5$ kg/cm <sup>2</sup> )	伸び率 (%)
D22	3592	5633	1.82	21
D16	3928	6097	1.88	19
D13	3693	5642	1.83	25
D10	3836	5535	1.83	22
6 $\phi$	4107	5428	1.92	—

表 7.5 ラーメンの付着応力度 (単位, kg/cm<sup>2</sup>)

Table 7.5. Bond stresses of framed specimens.

		0.025 mm 時	最大荷重時
D13	石膏	49.30	99.26
	コンクリート	42.45	107.52
D16	石膏	49.00	92.39
	コンクリート	35.23	102.57
D22	石膏	36.16	81.45
	コンクリート	31.02	94.30

表 7.3 より石膏の低温時における強度の比 (常温養生時強度/0°C 養生時強度) は 1.07 となり、既述の通り十分である。

また、表 7.5 より付着応力度は石膏およびコンクリートとも鉄筋径が小さいものほど高く、変形量 0.025 mm 時におけるそれは石膏の方がコンクリートに比べて 1.23 倍ほど高いが、最大荷重時には、コンクリートの方が 1.11 倍ほど高い。

#### 7.2.2. 実験装置と試験方法

実験装置を図 7.2 に示す。試験体は水平荷重による移動を考慮し、8 本の PC 鋼棒でテストフロアーに緊結した。

柱軸力は各々柱頭にオイルジャッキ (50 ton) を用いて載荷し、荷重はロードセル (50 ton) で検出した。

また、柱軸力の反力は上部を鉄骨アタッチメントに、下部は試験体基礎部分に、それぞれ引張用球座を取り付け、PC 鋼棒で上下球座を結合し、軸力が常に垂直に、かつ一定に作用するように調整した。

水平力は、串型オイルジャッキ (50 ton) を反力壁に緊結し、試験体左右の加力面には球座を設け、正負加力時に加力治具による曲げモーメントが、ラーメンに伝達しないよう配慮した。なお、本実験における軸力用のオイルジャッキが試験体の水平変位に追随し、かつ梁の

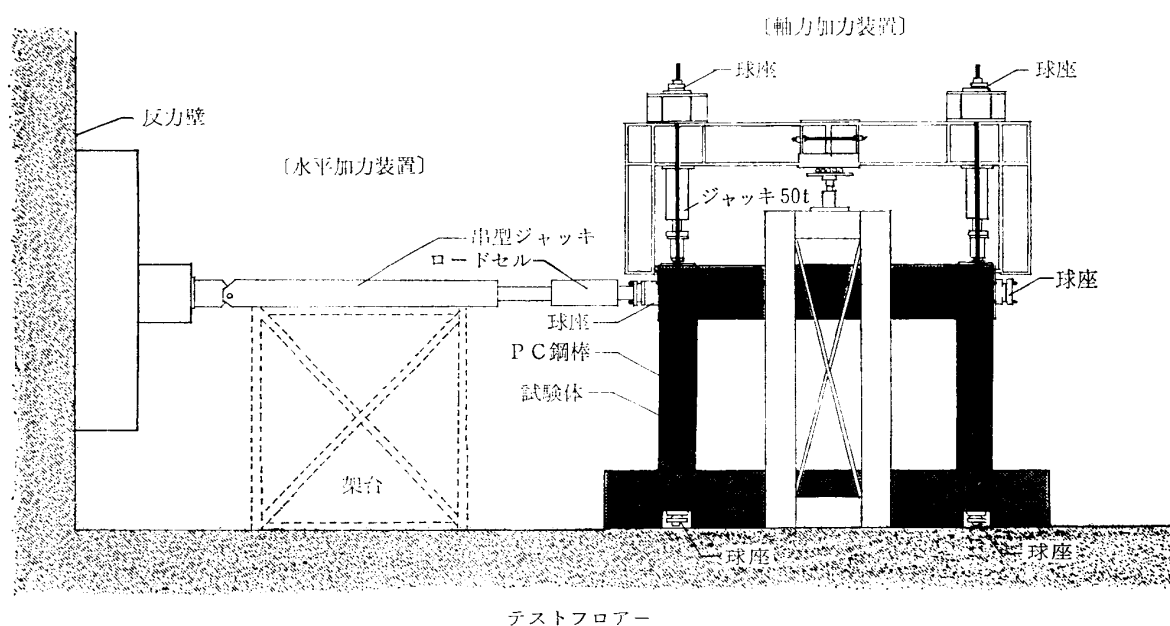


図 7.2 ラーメンの実験装置  
Fig. 7.2. Test setup for framed specimen.

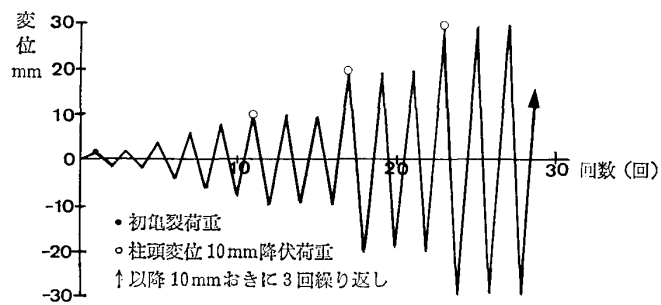
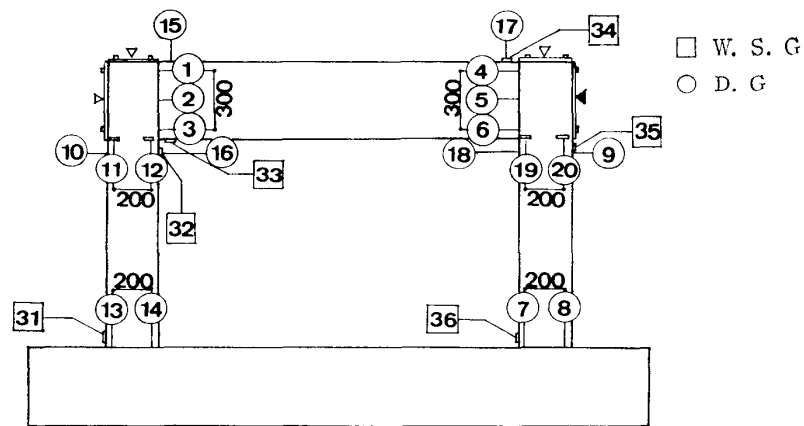
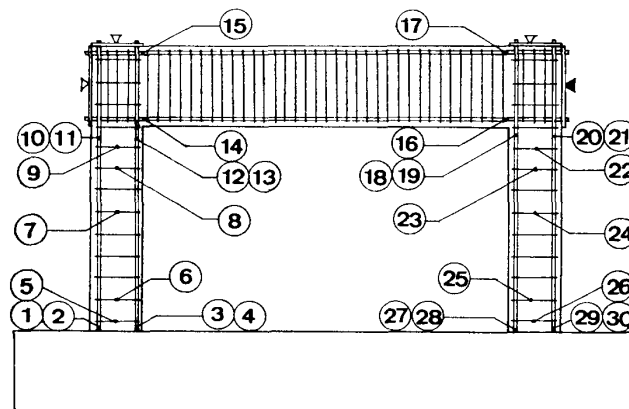


図 7.3 ラーメンの加力計画

Fig. 7.3. Loading excursion for framed specimen.



(a)



(b)

図 7.4 ラーメンの測定位置

(a) ダイアルゲージおよびストレインゲージ (試験体表面)

(b) ストレインゲージ (鉄筋)

Fig. 7.4. Measuring points of framed specimen. (a) Positions of dial gauges and wire strain gauges attached to the surface of specimen. (b) Positions of wire strain gauges attached to the reinforcing bars.

両節点間の伸びによって発生する，梁軸力の増加を除去するため，上部鉄骨アタッチメント（軸力加力装置）を中央で切断し，PC 鋼棒で接続して，その伸びを吸収できるように工夫した。

加力は各柱頭に 25 ton ( $40 \text{ kg/cm}^2$ ) の軸力を加え，常に一定に保ちながら，正負の水平加力を行った。水平方向の加力計画を図 7.3 に示す。

変位と歪の測定個所を図 7.4 (a), (b) に示す。

### 7.3. ラーメンの解析方法

ラーメンの解析は図 7.5 に示すように柱，梁を 11 節点で区切り，柱脚固定の 10 個の線部材から成り立っているものとし，マトリックス法で応力および変形を求め，増分法にて解析した。また，節点におけるモーメント（柱頭部における柱，梁接合部のモーメントはフェイスモーメント）が曲げ終局モーメント（圧縮側コンクリートが終局歪度に達した時のモーメント）に達すると塑性ヒンジにおきかえ，崩壊形になるまで追跡した。なお，塑性ヒンジ発生以後，水平力の増加に伴う柱軸力の増減により引き起こされる終局モーメントおよび剪断力の修正を随時おこなった。また，柱の水平変位による軸力の影響は考慮したが，剪断変形については無視した。

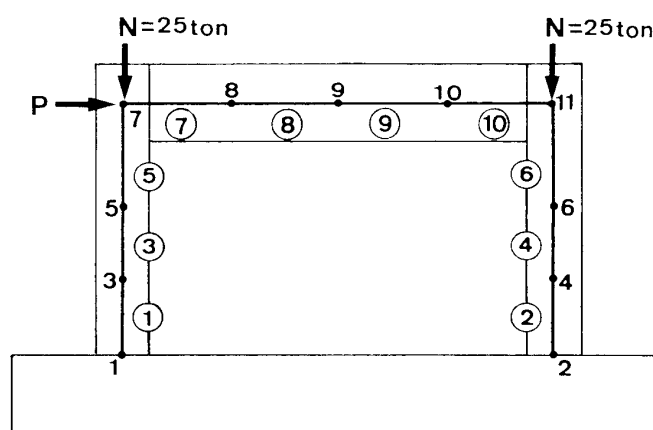


図 7.5 節点および部材番号

Fig. 7.5. Member and nodal numbers.

### 7.4. 実験結果と考察

#### 7.4.1. 実験結果と計算結果の比較

各試験体について実験結果と諸荷重に対する既往の略算式および理論式を用いた計算結果を表 7.6 に，また各試験体の柱頭中央（図 7.4 (a) ダイアルゲージ No. 2）の荷重-水平変位 ( $P-\delta$ ) 曲線を図 7.6 (a)~(h) に示す。

表 7.6 ラーメンの実  
Table 7.6. Test results and predicted

試 験 体			FGMD・ $P_w$ 02		FGMD・ $P_w$ 06		FGMD・ $P_w$ 12	
			正	負	正	負	正	負
曲げ初亀裂荷重 (ton)	柱	実験値 計算値	5.0 6.15	8.0	8.5 6.15	8.5	4.5 6.15	4.5
		実／計	0.81	1.30	1.38	1.38	0.73	0.73
	梁	実験値 計算値	8.0 10.61	6.0	13.0 10.61	14.0	10.0 10.61	11.5
		実／計	0.75	0.57	1.23	1.32	0.94	1.08
曲げ剪断荷重 (ton)	柱	実験値 計算値	13.0 13.0	14.0	14.0 13.0	16.0	14.0 13.0	12.5
		実／計	1.00	1.08	1.08	1.23	1.08	0.96
	梁	実験値 計算値	20.0 22.25	18.0	20.8 22.25	17.0	20.0 22.25	17.0
		実／計	0.90	0.81	0.93	0.76	0.90	0.76
剪断亀裂荷重 (ton)	柱	実験値 計算値	14.3 8.7	14.3	21.0 8.7	20.0	18.0 8.7	20.0
		実／計	1.64	1.64	2.41	2.30	2.07	2.30
	梁	実験値 計算値	— 19.5	—	— 19.5	—	— 19.5	—
		実／計	—	—	—	—	—	—
曲げ降伏荷重 (ton)	柱	実験値 計算値	22.0 24.4	23.0	23.0 24.4	22.0	21.0 24.4	21.0
		実／計	0.90	0.94	0.94	0.90	0.86	0.86
最大荷重	曲げ終局荷重 (ton)	実験値 計算値	23.5 25.70	23.0	24.5 25.70	23.5	23.5 25.70	23.5
		実／計	0.91	0.90	0.95	0.91	0.91	0.91
	剪断終局荷重 (ton)	計算値	26.50		31.70		—	
		実／計	0.89	0.87	0.77	0.74	—	—
初 期 剛 性 ( $\times 10^{-4}$ rad/ton)		実験値 計算値	1.50 1.28	1.60	1.64 1.28	1.76	1.60 1.28	1.70
		実／計	1.17	1.25	1.28	1.38	1.25	1.33
降 伏 時 剛 性 ( $\times 10^{-4}$ rad/ton)		実験値 計算値	3.64 6.07	4.55	4.00 6.07	4.17	3.64 6.07	4.35
		実／計	0.60	0.75	0.66	0.69	0.60	0.72
限 界 変 形 (mm) ( $\times 10^{-1}$ rad)			20.00 0.16	20.00 0.16	50.00 0.40	50.00 0.40	70.00 0.56	70.00 0.56
塑 性 率			2.0	1.6	4.2	4.2	7.0	5.6

注1) 上記荷重はラーメンに加わる水平荷重値 注2) FGMD・ $B_y$  に関しては 40 mm 変形時までは



験結果および計算結果

ones on framed specimens.

FCOD • $P_w$ 02		FCOD • $P_w$ 06		FCOD • $P_w$ 12		FGMD • $B_y$		FCOD • $B_y$	
正	負	正	負	正	負	正	負	正	負
7.0	8.0	4.0	2.0	7.0	7.0	2.0	2.0	5.5	4.0
5.58		5.58		5.58		6.05		5.51	
1.25	1.43	0.77	0.36	1.25	1.25	0.33	0.33	1.00	0.73
18.0	13.0	9.0	10.0	14.0	15.5	7.0	4.0	6.0	8.5
8.52		8.52		8.52		8.43		7.37	
2.11	1.53	1.06	1.17	1.64	1.82	0.83	0.47	0.81	1.15
15.0	15.1	14.8	10.0	16.0	15.5	10.0	10.0	10.0	10.0
12.0		12.0		12.0		12.5		11.5	
1.25	1.26	1.23	0.83	1.33	1.29	0.80	0.80	0.87	0.87
17.0	17.0	17.5	14.8	18.0	20.5	10.0	10.0	12.5	13.3
21.8		21.8		21.8		—		—	
0.78	0.78	0.80	0.68	0.83	0.94	—	—	—	—
21.8	21.8	20.0	21.0	19.3	21.5	20.0	23.0	18.3	18.3
8.3		8.3		8.3		8.5		7.9	
2.63	2.63	2.41	2.53	2.33	2.59	2.35	2.71	2.32	2.32
22.5	14.75	25.0	25.0	25.8	23.0	—	—	—	—
19.0		19.0		19.0		—		—	
1.18	0.78	1.32	1.32	1.36	1.21	—	—	—	—
23.0	23.0	22.0	21.0	23.0	22.0	18.0	18.0	21.0	21.0
24.0		24.0		24.0		18.9		18.9	
0.96	0.96	0.92	0.88	0.96	0.92	0.96	0.96	1.11	1.11
24.5	24.0	25.3	25.5	26.5	24.5	21.8	23.8	21.8	22.0
25.37		25.37		25.37		20.75		19.96	
0.97	0.95	1.00	1.01	1.04	0.97	1.05	1.15	1.09	1.10
25.10		30.57		—		—		—	
0.98	0.96	0.83	0.83	—	—	—	—	—	—
1.20	1.40	1.60	1.64	1.33	1.52	2.00	2.08	1.71	2.16
0.89		0.89		0.89		1.33		0.91	
1.35	1.57	1.80	1.84	1.49	1.71	1.50	1.56	1.88	2.37
4.67	4.35	4.10	4.64	4.16	4.33	7.80	8.00	7.00	6.00
5.29		5.29		5.29		6.45		5.81	
0.88	0.82	0.78	0.88	0.79	0.82	1.21	1.24	1.20	1.03
20.00	20.00	50.00	50.00	80.00	80.00	70.00	70.00	70.00	70.00
0.16	0.16	0.40	0.40	0.64	0.64	0.56	0.56	0.56	0.56
1.4	1.6	4.1	3.4	6.2	6.2	3.6	3.5	4.0	4.7

加力治具の調整をおこたったため梁の伸びを拘束した。

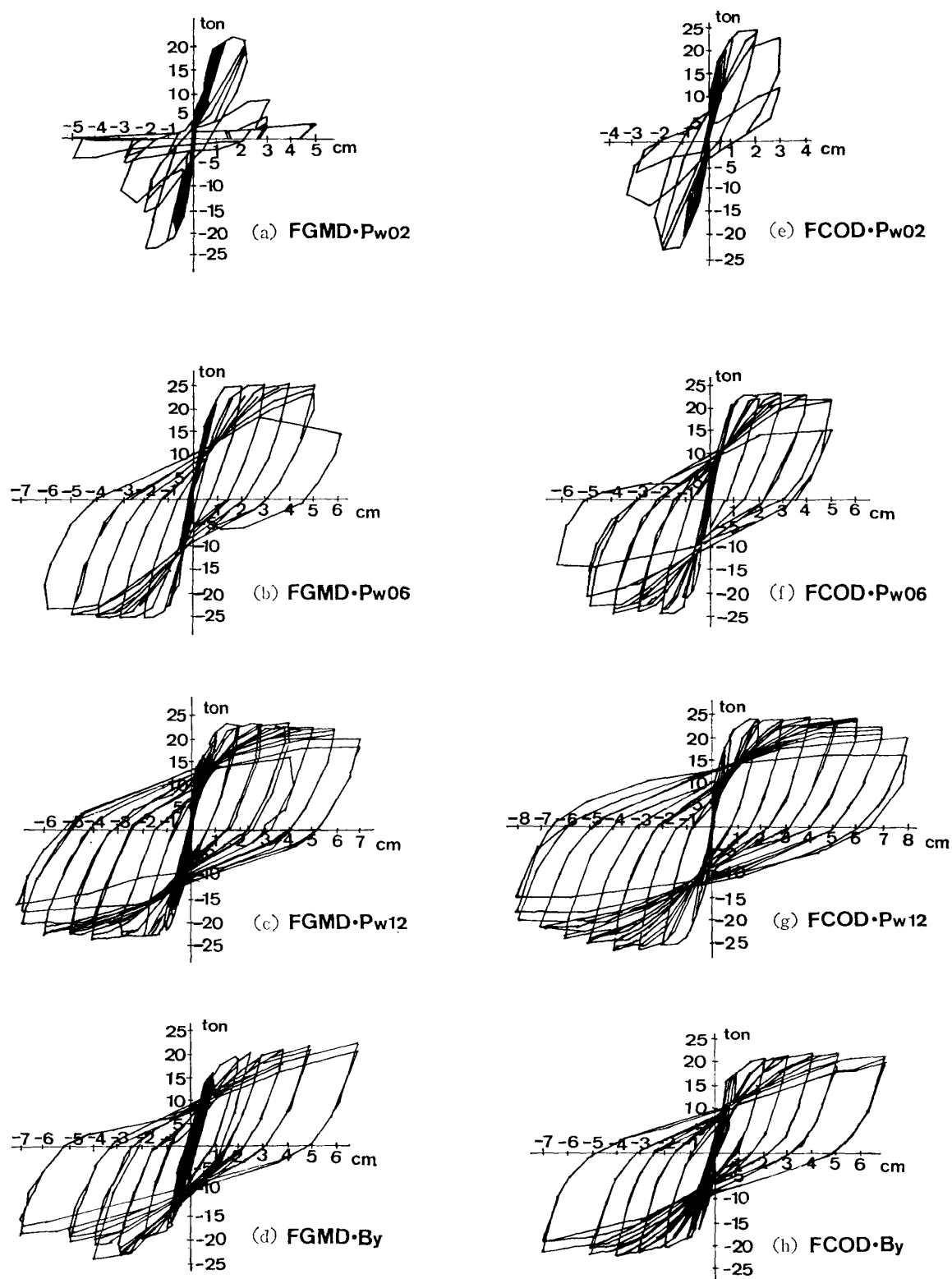
図 7.6 ラーメンの  $P$ - $\delta$  曲線

Fig. 7.6. Load-deflection curve of framed specimens.

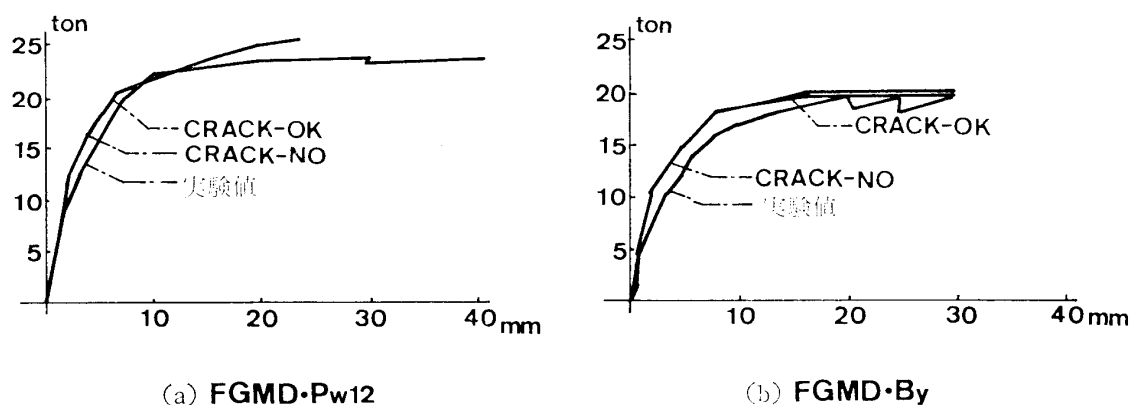
図 7.7  $P-\delta$  曲線と理論値

Fig. 7.7. Experimental and theoretical load-deflection curves.

各試験体の耐力および変形は、図 7.6 (a)~(h) で見るように石膏ラーメンと RC ラーメンはほぼ同じような性状を示し、剪断補強筋比  $P_w$  0.2% 以外はかなりの保有耐力を示している。

図 7.7 に  $FGMD \cdot P_w 12$  および  $FGMD \cdot B_y$  の実験値の包絡線と計算値を示す。計算値のうち **CRACK-OK** は図 7.5 の ①~⑩ 部材とも亀裂が生じるものと仮定、**CRACK-NO** は ③ ④ ⑧ ⑨ 部材は弾性剛性、その他の部材は亀裂が生じるものと仮定して求めたものである。

実験値と計算値の比較では、計算値の方が高い剛性を示し、亀裂を拘束した場合と、そうでない場合は、ほぼ同じような剛性で実験値と計算値は比較的一致した。

#### 7.4.2. 保有耐力

図 7.6 に示すラーメンの  $P-\delta$  曲線を基に各試験体について、保有耐力の評価を試みた。ラーメンの強度試験に示される  $P-\delta$  曲線は、最大水平耐力と塑性率とを個別に比較検討するのが常であるが、ここでは水平耐力と塑性率を同時に相対評価した。これは水平耐力はあっても、塑性率が小さく、靱性に富んでいないものと、その逆の性質のものも同等に評価しようというものである。

一般に、ラーメンの  $P-\delta$  曲線は、塑性領域に入ると、単純な正比例関係がくずれ、履歴減衰が生じるため、1 サイクルごとにループを描き、ここで描かれたある任意のサイクルのループ面積  $A_i$  (図 7.8) を歪エネルギーと考え、この量が振動エネルギーを吸収する量と等しいと仮定し、その安全性を評価した。

まず、 $Q_a$ ,  $X_a$  が図 7.6 に示す各サイクルの最大振幅 (変位) 時の平均値とすれば、それら

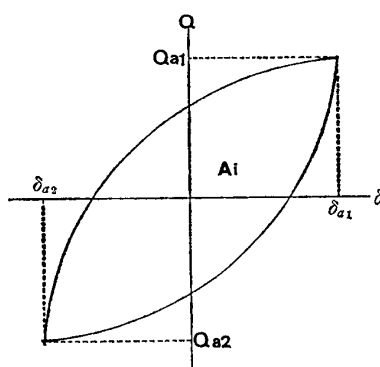


図 7.8 剪断力-変形関係

Fig. 7.8. Relation between lateral load and displacement.

は次式で与えられる.

$$Q_a = \frac{1}{2}(Q_{a1} + Q_{a2}), \quad (7.1)$$

$$X_a = \frac{1}{2}(\delta_{a1} + \delta_{a2}). \quad (7.2)$$

そこで, 山田 (1967) の共振容量  $C_R$

$$C_{Ri} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{A_i}{X_{ai}} \quad (7.3)$$

を用い各試験体の  $C_R-N_C-X_a$  の関係を図 7.9 (a)~(h) に示す. この図より, 共振崩壊曲線 ( $C_R-N_C-X_a$  空間において, ある空間を境にしてそれより外に存在できない限界の点の集合) が実際に存在すると思われるが, この曲線を予測することができれば, あらゆる試験体に対する保有耐力を見いだすことができる.

そこで, 各試験体の  $C_R$  を各サイクルの代表する値 (同じ変位で 3 回制御して水平加力している場合, その変位の最初の値) で  $\Sigma C_{Ri}$  を求め, その結果と FGMD・ $P_w$  02 に対する比較を表 7.7 に示す.

表 7.7 ラーメンの保有耐力 (単位, ton)

Table 7.7. Potential strength of each rigid frame's specimen as calculated from the load-displacement curve.

試験体	FGMD・ $P_w$ 02	FCOD・ $P_w$ 02	FGMD・ $P_w$ 06	FCOD・ $P_w$ 06	FGMD・ $P_w$ 12	FCOD・ $P_w$ 12	FGMD・ $B_y$	FCOD・ $B_y$
$\Sigma C_{Ri}$	18.82 (1.00)	23.74 (1.26)	55.98 (2.97)	60.44 (3.21)	67.19 (3.57)	79.29 (4.21)	55.77 (2.86)	55.25 (2.94)

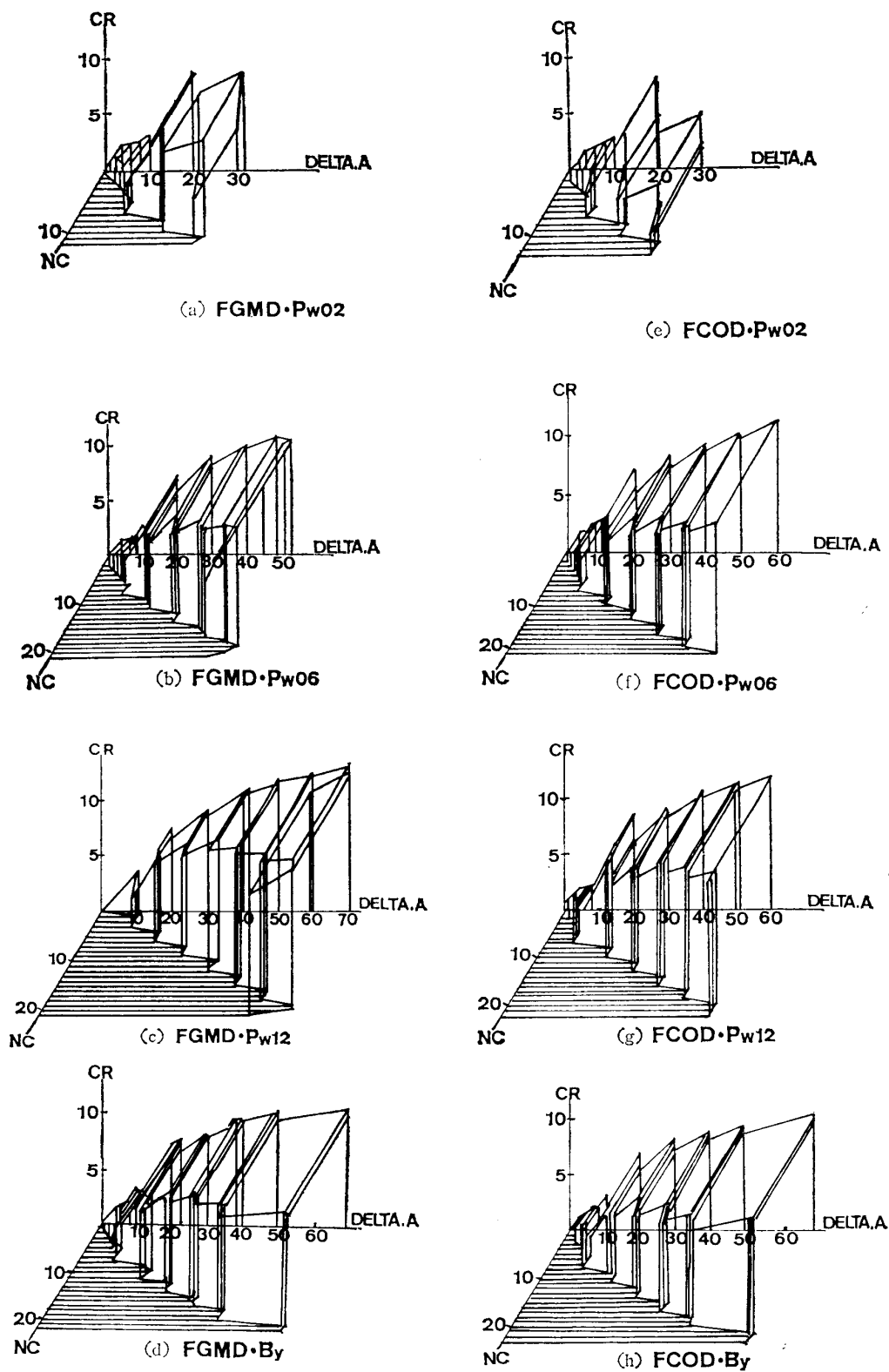


図 7.9  $C_R-N_C-X_a$  曲線  
Fig. 7.9.  $C_R-N_C-X_a$  relation curve.

この表から各試験体の保有耐力は、石膏ラーメン、RC ラーメンとも、ほぼ近似しており、 $P_w$  が 0.2% から 0.6% に増えると正比例的に  $C_R$  も増加することがわかる。しかし、 $P_w$  が 1.2% の場合は正比例的には増加しない。これは柱の  $P_w$  をある限度以上増しても、耐力があがらないことを意味しており、ある値で収束すると思われる。

次に等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  は、

$$h_{eq} = \frac{A_i}{4\pi} \cdot \frac{1}{(1/2) \cdot Q_i \cdot X_a} \quad (7.4)$$

を求め、各サイクルの代表値とその時の塑性率との関係を各試験体ごとに図 7.10 に示す。これから、塑性率が増加すると  $h_{eq}$  も増加し、しだいにその定数の増加率が減少していくが、この増加率は bi-linear な関係にあると予測できる。

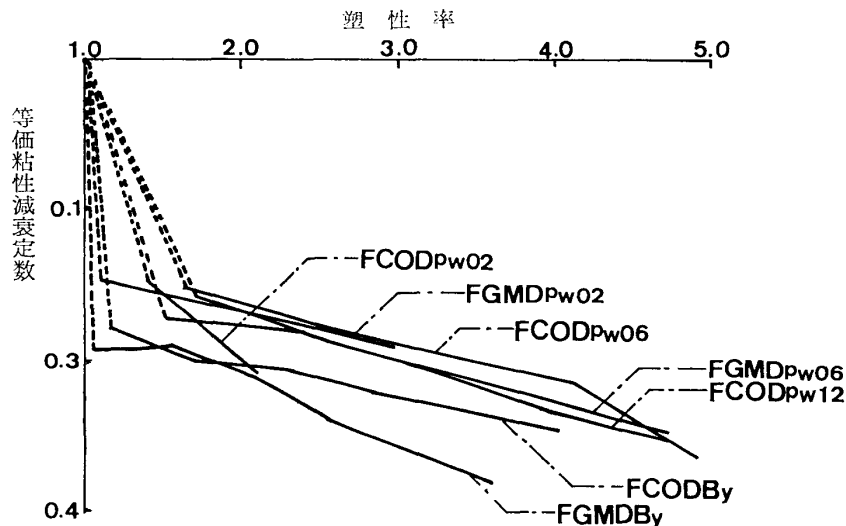


図 7.10 ラーメンの塑性率と等価粘性減衰定数 ( $h_{eq}$ )

Fig. 7.10. Relation between ductility factor and equivalent viscous damping factor  $h_{eq}$  of framed specimens.

#### 7.4.3. 破壊機構

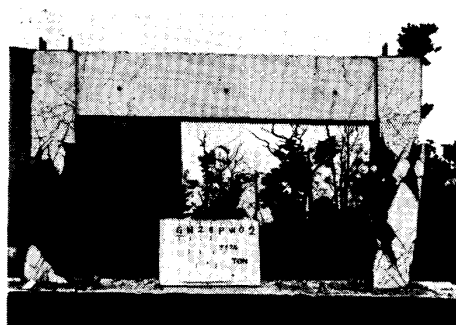
##### (1) 破壊機構の概要

7.2.1. で述べた層崩壊形および梁崩壊形の各試験体について、その終局的な変形量および破壊性状の相違を実験より求め、あわせて図 7.6 実験結果および表 7.6 計算結果も加えて比較検討する。

ここに各試験体の実験終了後の写真を図 7.11 (a)~(h) に示す。

##### (2) 層崩壊形

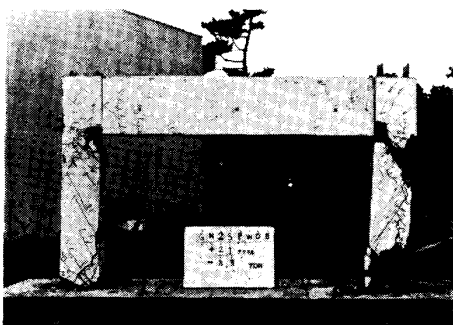
##### (i) 剪断斜張力破壊 (FGMD・ $P_w$ 02 および FCOD・ $P_w$ 02)



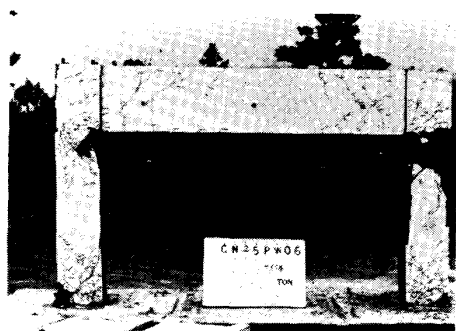
(a) FGMD· $P_w$  02



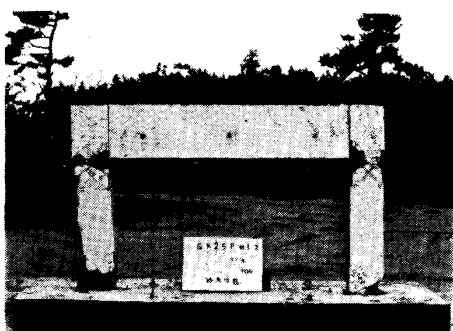
(e) FCOD· $P_w$  02



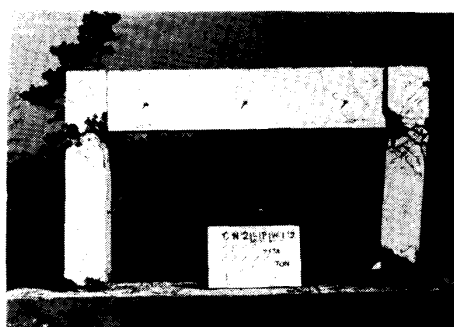
(b) FGMD· $P_w$  06



(f) FCOD· $P_w$  06



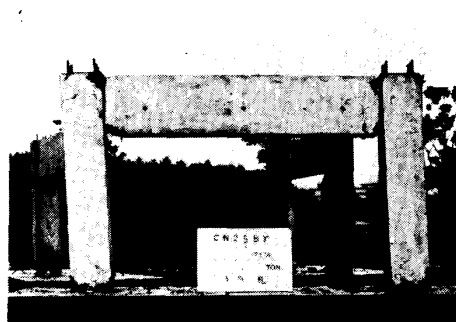
(c) FGMD· $P_w$  12



(g) FCOD· $P_w$  12



(d) FGMD· $B_y$



(h) FCOD· $B_y$

図 7.11 ラーマンの実験終了後の写真

Fig. 7.11. Photographs of framed specimens after test.

これらの試験体の崩壊に至るまでの過程は、まず、柱脚に曲げ亀裂が生じ、その後同亀裂先端付近から曲げ剪断亀裂が進行し、ついで斜張力亀裂が発生した。

石膏ラーメンの場合、変形性能は、限界変形 20 mm であり、同変形時の 2 回目の繰り返しにより約 30% の耐力低下をきたし、30 mm 時では 50% 以下の耐力となった。破壊性状(図 7.11 (a))は左右の柱とも斜張力亀裂が進行し、柱中央部の石膏が脱落した。その後図 7.6 (a) で見るように変形量は大きくなるが、剪断力が小さくなったため、曲げおよび剪断亀裂幅が縮小し、主筋および主筋内の石膏と柱軸力が釣合い、軸力保持の状態ではあるが、著しく耐力が低下したので実験を終了した。

RC ラーメンの場合、破壊性状は、負荷荷時変形量 30 mm で図 7.11 (e) で見るように左柱に斜張力破壊が生じ、約 50% の耐力低下をきたした。その後右柱は付着亀裂が急激に進行、付着割裂破壊が起こった。また、東他 (1974) の斜張力亀裂発生略算式 (7.5) を用いて、石膏および RC ラーメンの計算結果を図 7.12 に示した。

なお、斜張力破壊型限界帯筋比は、式 (7.6) を用いた。

$$cQ_{DTC} = \frac{c\sigma_t}{1.5} \cdot b \cdot D \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{c\sigma_t}}, \quad (7.5)$$

$$P_{wDTC} = \frac{c\sigma_t}{\cos^2 \theta \cdot \sigma_{wy}}, \quad \theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} 2 \cdot \sqrt{\frac{c\sigma_t}{\sigma_0} + \left(\frac{c\sigma_t}{\sigma_0}\right)^2}. \quad (7.6)$$

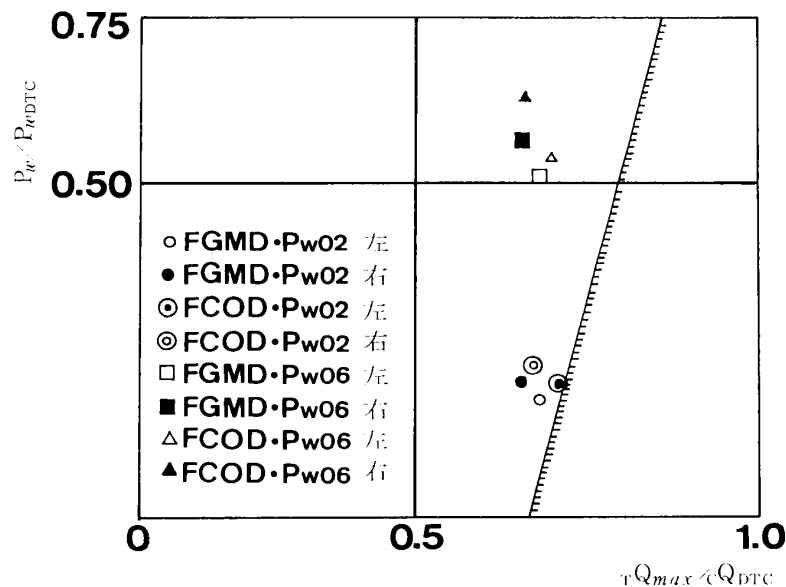


図 7.12 ラーメンの斜張力亀裂および限界帯筋比

Fig. 7.12. Diagonal tension crack and limit of hoop reinforcement ratio for framed specimens.



(ii) 剪断圧縮破壊 (FGMD・ $P_w$  06 および FCOD・ $P_w$  06)

これらは剪断亀裂が発生してから、剪断亀裂面の広がりは見られず、圧縮側の石膏またはコンクリートが変位の増大に伴って圧壊した。

石膏ラーメンの終局時の破壊性状は、変形量 50 mm の時点で図 7.11 (b) で見るように左右の柱とも中央部に斜張力亀裂が発生しはじめ、繰返し回数の増大に伴い、同亀裂が多数発生した。終局時には、同変形時の負荷荷 3 回目で柱頭・柱脚に剪断破壊を起こし 30% 程度の耐力低下があった。

RC ラーメン (図 7.11 (f)) の終局時の破壊性状も石膏ラーメンとほとんど同じであるが、石膏ラーメンは左右の柱とも斜張力亀裂が生じたのに対し、RC ラーメンの場合は、右柱にのみ斜張力亀裂が生じた。

これらの試験体は限界変形 50 mm となり、かなりの靱性を発揮した。

また、東他 (1974) の略算式 (7.7)~(7.9) を用いた結果を表 7.8 に示す。

$$x_{n1} = \frac{x_n}{D} = \frac{N + a_t \cdot s \sigma_y}{0.85 \cdot \sigma_B \cdot b \cdot D}, \quad (7.7)$$

$$\sigma_1 = -0.425 \sigma_B + \sqrt{(0.425 \sigma_B)^2 + \tau^2}, \quad \tau = \frac{T Q_{\max}}{b \cdot x_n}, \quad (7.8)$$

$$P_{wz} = \frac{T Q_{\max}}{b \cdot j \cdot s \sigma_{wy}}. \quad (7.9)$$

石膏・RC ラーメンとも  $\sigma_1 / \sigma_t + 6 \cdot x_n / D$  は 3 以下となり靱性のある結果となった。

表 7.8 ラーメンの剪断圧縮破壊  
Table 7.8. Shear-compression failure of framed specimens.

試 験 体	FGMD・ $P_w$ 06		FCOD・ $P_w$ 06	
$P_w / P_{wz}$	0.99	0.83	1.00	0.85
$\sigma_1 / \sigma_t + 6 \cdot x_n / D$	2.08	2.43	2.20	2.64

(iii) 曲げ座屈破壊 (FGMD・ $P_w$  12 および FCOD・ $P_w$  12)

図 7.6 (c), (g) より、降伏時剛性は同程度であるが、限界変形量は石膏ラーメンは 70 mm, RC ラーメンが 80 mm と若干の相違が見られた。

終局時の破壊性状は柱頭、柱脚で主筋外部の石膏またはコンクリートが圧壊、剝離し、同部分の主筋に座屈が生じ、耐力が急激に低下した (図 7.11 (c), (g))。主筋座屈発生時の部材角  $\epsilon_{Bu}$  を広沢・柳沢 (1975) の略算式 (7.10) を用いて計算した結果を表 7.9 に示す。

$${}_eR_{Bu} = \sqrt{\frac{0.12 \cdot x_{n1}}{\lambda}} \quad (7.10)$$

ここに,

$$\lambda = \frac{l_k}{i} = 4 \cdot \frac{x}{\phi}$$

$x_{n1}$ : 式 (7.7)

$\phi$ : 主筋の直径

$x$ : 剪断補強筋の間隔

表 7.9 ラーメンの主筋座屈発生時の部材角 (単位, rad)

Table 7.9. Member rotation angles at buckling of main reinforcements in framed specimens.

試 験 体	実 験 値	略 算 値	実験値/略算値
FGMD・ $P_w$ 12	0.056	0.053	1.06
FCOD・ $P_w$ 12	0.064	0.056	1.14

### (3) 梁崩壊形 (FGMD・ $B_y$ および FCOD・ $B_y$ )

ここでは加力の増加に伴い, 梁端部の亀裂は増大し, 梁中央部の亀裂は閉じる傾向にあった. また正負の繰返し載荷回数の増加とともに, 図 7.13 に示すように梁主筋の抜け出しによる伸びが大きくなった.

図 7.6 (d), (h) は水平加力治具の反対側変位 (図 7.4 (a) ダイアルゲージ No. 5) を基に描いた  $P-\delta$  曲線であるが, 左の柱の変位は正載荷時は小さく, 負載荷では大きくなり, 柱の負担剪断力は左右の柱で異なった.

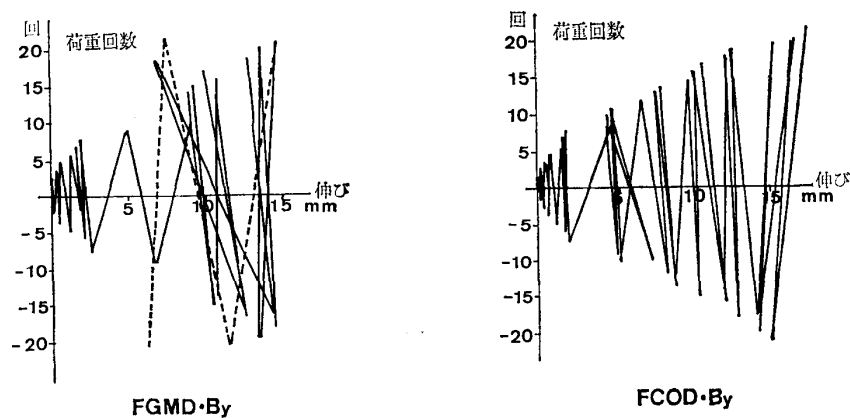


図 7.13 梁主筋の伸び

Fig. 7.13. Number of cyclic relation between loading and elongation of beam length.

これは  $FGMD \cdot B_y$  の試験体 (図 7.6 (d)) に顕著に現れた。すなわち、変位 40 mm までは、梁の伸びによる変位を加力治具で拘束したため、負方向で耐力の増加が見られ、その拘束を 50 mm 時点で解除したため、以後正負載荷時とも、同程度の耐力を示した。

また、崩壊時は変形量 70 mm で梁の主筋の座屈および梁端部の石膏またはコンクリートが一部脱落し、梁部分が短くなったが、水平加力により崩壊面がふさがれ、新たな釣合いが生じ、耐力低下、および軸力低下は生じなかったが、軸力載荷面の球座が回転に追従できなくなり、実験を終了した。

#### (4) 柱剪断補強筋比の変化による変形性能および破壊性状の相違

柱剪断補強筋比  $P_w 02$  の試験体は、剪断斜張力破壊を起こし、限界部材角は石膏ラーメン、RC ラーメンとも、0.016 rad. と小さかった。これを基準に他の試験体と比較すると、 $P_w 06$  の試験体は石膏ラーメン、RC ラーメンとも剪断圧縮破壊であり、限界部材角は 0.064 rad. で  $P_w 02$  の 2.5 倍と比較的靱性に富んだ。また、 $P_w 12$  の試験体は典型的な曲げ座屈破壊形であり、限界部材角は石膏ラーメンが 0.056 rad. で 3.5 倍、RC ラーメンが 0.065 rad. で 4.0 倍と、大きな変形能力があった。

#### 7.4.4. 考察

ラーメンの実験では、特にその試験装置について工夫をしたが、ほぼ予想通りの結果を得ることができた。

##### (1) 曲げ初亀裂荷重および剪断亀裂荷重

石膏ラーメン、RC ラーメンとも実験値、計算値にかなりばらつきがあった。

##### (2) 最大耐力

単軸圧縮試験では表 7.3 より石膏の方が 1.13 倍と高い値であったが、ラーメンの試験では石膏の方が低い値を示し、梁崩壊形ではほとんど同じ値であった。

##### (3) 変形性能

図 7.6 よりほとんど同程度の変形であるが、RC ラーメンの方がやや勝っている。

##### (4) 剪断補強筋

石膏ラーメンのうち  $P_w 02$  では、変形量 20 mm の小変形で、すでに脆性破壊を起こした。補強筋比を増加させる必要がある。

## 8. お わ り に

各種石膏の諸性能から、大型構造部材としての梁、柱およびラーメンの力学的特性まで、

同種類の RC 部材と比較しながら実験を行い、構造部材としての耐力および破壊性状を検討し、あわせて昭和基地の外的環境から、養生温度をパラメーターとした石膏単体の諸試験はもとより、構造部材としての梁および大型構造部材の同一試料から採取したシリンダー供試体の低温養生時における試験等を行い、大型構造部材としての低温特性を推察したが、クリープ、凍結融解および耐久性（耐候性）等いまだ未解決の分野もある。特に、この実験を通じて、石膏試験体の製作にかかわる難しさ、施工性の問題等も残されている。

しかし、今までに行ったいくつかの実験から各種石膏のうち、II 型無水石膏改良品をマトリックス相として選び、軽量骨材との複合材料を、さらに異形鉄筋を用いて、鉄筋補強軽量石膏部材としたときに、その基本的な短所を改良し、構造部材としての石膏梁、石膏柱および石膏ラーメンに関して、耐力および変形性能等に満足する結果を得ることができた。それらの詳報については、それぞれの章に述べてある。また各章で用いた解析方法等、特に式の誘導に関して、主題の範囲を超えるため、別の機会に述べることにしたい。

また、低温に対する試験では、石膏自体の特性として、打設時および養生時ともその性能に優れ、おおむね、夏に行った試験体製作には、練り混ぜは水に氷を混入して打設時の温度を下げる等、いかにも南極の材料にふさわしい実験をすることができた。この他、石膏の組成上の欠点—たとえば弱酸性等—は、II 型無水石膏改良品として製造の過程で、その欠点を改良していただいた。これも主題の範囲を超えるものとして、ここではふれていない。

以上、RC 部材と比較しながら、その特性を述べた。その結果、石膏が複合材料として、本来の短所を改良することにより、構造部材として比強度が大きく、復元力特性および破壊性能ともに優れ、特に降伏時剛性、限界変形はむしろ RC 部材に比べて石膏部材の方に性能の良いものがあり、南極昭和基地の構造材料として、その可能性を見ることができた。

## 謝 辞

本研究に関し、最初指針を与えて下さった東京大学教授岸谷孝一先生、また、終始御指導いただいた日本大学教授松井嘉孝先生、東京大学大学院生平居孝之氏、小野田セメント中央研究所藤本洋志氏に厚くお礼申し上げます。

石膏および軽量骨材は、小野田セメント（株）および三井金属工業（株）から提供を受け、特に小野田セメント（株）からは、材料の他にも多大の御援助を得ました。深く感謝致します。

実験 および 資料の 整理には、大型構造物試験棟の小磯、岡村両先生、大学院生織戸、水

梨, 滝野, 齊藤君および構造力学研究会の学生諸君には多大の協力を得ました。改めて御礼申し上げます。

また, この研究が, 国立極地研究所共同研究費および日本大学学術助成金によるものであることを付記して謝辞と致します。

## 文 献

- 東 洋一・広沢雅也・西垣太郎 (1974): 鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究 (その 20, せん断破壊について). 昭和 49 年度 (北陸) 大会学術講演梗概集, 東京, 日本建築学会, 1327-1328.
- 後藤一雄・岡島達雄 (1972): FRG-Composite の力学的性質. 昭和 47 年度 (九州) 大会学術講演梗概集, 東京, 日本建築学会, 307-308.
- 広沢雅也・柳沢延房 (1973): 鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究 (その 3: 既往の柱実験及び実在の柱の構造因子). 昭和 48 年度 (東北) 大会学術講演梗概集, 東京, 日本建築学会, 1417-1418.
- 広沢雅也・柳沢延房 (1975): 鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究 (その 30: 主筋の座屈). 昭和 50 年度秋季大会 (関東) 大会学術講演梗概集, 東京, 日本建築学会, 1127-1128.
- 岸谷孝一・平居孝之 (1972): セッコウをマトリックスとした複合材料に関する実験的研究. 昭和 47 年度 (九州) 大会学術講演梗概集, 東京, 日本建築学会, 305-306.
- 岸谷孝一・平居孝之 (1977a): 建築材料としての無機複合材料に関する研究 (その 1・マトリックス相として見た石膏の性質・基礎的な物性). 日本建築学会論文報告集, **254**, 21-26.
- 岸谷孝一・平居孝之 (1977b): 建築材料としての無機複合材料に関する研究 (その 2・マトリックス相として見た石膏の性質・環境条件に対する応答). 日本建築学会論文報告集, **255**, 1-6.
- 岸谷孝一・平居孝之 (1977c): 建築材料としての無機複合材料に関する研究 (その 3・マトリックス相として見た石膏の性質・力学的性能). 日本建築学会論文報告集, **256**, 1-6.
- 岸谷孝一・平居孝之 (1977d): 建築材料としての無機複合材料に関する研究 (その 4・粒子強化). 日本建築学会論文報告集, **257**, 1-7.
- 岸谷孝一・平居孝之 (1977e): 建築材料としての無機複合材料に関する研究 (その 5・せんい強化・実験編). 日本建築学会論文報告集, **258**, 1-8.
- 岸谷孝一・平居孝之 (1977f): 建築材料としての無機複合材料に関する研究 (その 6・せんい強化・引張強度の理論式とせんいの分散による強化係数  $k$ ). 日本建築学会論文報告集, **259**, 1-7.
- 岸谷孝一・平居孝之 (1977g): 建築材料としての無機複合材料に関する研究 (その 7・せんい強化・終局引張強度の理論値と実験値). 日本建築学会論文報告集, **260**, 1-7.
- 岸谷孝一・平居孝之 (1977h): 建築材料としての無機複合材料に関する研究 (その 8・粒子とせんいによる材料性能の強化と部材の構造性能の関係・解析編). 日本建築学会論文報告集, **261**, 7-12.
- 岸谷孝一・平居孝之 (1977i): 建築材料としての無機複合材料に関する研究 (その 9・粒子とせんいによる材料性能の強化と部材の構造性能の関係・実験編). 日本建築学会論文報告集, **262**, 33-41.
- 岸谷孝一・平居孝之 (1978a): 建築材料としての無機複合材料に関する研究 (その 10・金属骨組強化・実験編). 日本建築学会論文報告集, **269**, 11-18.
- 岸谷孝一・平居孝之 (1978b): 建築材料としての無機複合材料に関する研究 (その 11・金属骨組強化・解析編). 日本建築学会論文報告集, **271**, 1-6.
- 黒正清治・滝口克己 (1971): 有限要素法による鉄筋コンクリート部材の二次元非線型解析 (その 1. 仮定および解析方法). 日本建築学会論文報告集, **189**, 51-57.

- MARTIN, H. C. (1966): Introduction to Matrix Methods of Structural Analysis. New York, McGraw-Hill, 331 p.
- 三林茂夫・吉村信敏 (1970): 有限要素法による構造解析プログラム. コンピュータによる構造工学講座 I-1-B, 培風館, 252.
- 武藤 清 (1964): 鉄筋コンクリート構造物の塑性設計. 東京, 丸善, 424 p (耐震設計シリーズ 2).
- NGO, D. and SCORDELIS, A. C. (1967): Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams. ACI, 152-163.
- 日本コンクリート工学協会 (1976): コンクリート便覧. 東京, 技報堂, 1007 p.
- 日本大学南極建築設計委員会 (1967): 南極地域観測隊建物. 建築雑誌, 839-845.
- 日本建築学会 (1975): 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説. 日本建築学会, 技報堂, 579 p.
- 野口 博 (1975): 鉄筋コンクリート柱の力学的挙動に関する研究 (その 1) 実験概要, 曲げ変形, 鉄筋およびコンクリートの歪について. 日本建築学会論文報告集, 233, 83-93.
- 小高昭夫・那須信治・竹内盛雄・桜井譲爾・谷 資信 (1979): 建築構造学 7 耐震耐風構造. 鹿島出版会, 296 p.
- 佐藤稔夫・小野 新・安達 洋・植松 哲・永井 裕 (1973): 鉄筋コンクリート部材の有限要素法による研究—鉄筋コンクリート部材の非線形解析—. 日本大学理工学部学術講演会講演論文集, 343-346.
- 佐藤稔夫・平山善吉・岡田 満・織戸敏行・水梨公雄 (1975a): 南極基地における構造材料としての石膏について (その 1) 基礎的諸性能. 日本大学理工学部学術講演会講演論文集, 261-264.
- 佐藤稔夫・平山善吉・岡田 満・織戸敏行・水梨公雄 (1975b): 南極基地における構造材料としての石膏について (その 2) 付着性能. 日本大学理工学部学術講演会講演論文集, 265-268.
- 佐藤稔夫・平山善吉・岡田 満・織戸敏行・水梨公雄 (1975c): 南極基地における構造材料としての石膏について (その 3) はりの曲げ強度試験. 日本大学理工学部学術講演会講演論文集, 269-272.
- 佐藤稔夫・平山善吉・岡田 満・岡村武士・水梨公雄 (1976): 南極基地における構造材料としての石膏について (その 4) 実大ばりの曲げ強度試験. 日本大学理工学部学術講演会講演論文集, 261-264.
- 佐藤稔夫・平山善吉・岡田 満 (1977a): 南極基地における構造材料としての石膏について (その 5) 柱の実験 1. 日本大学理工学部学術講演会講演論文集, 349-352.
- 佐藤稔夫・平山善吉・岡田 満 (1977b): 南極基地における構造材料としての石膏について (その 6) 柱の実験 2. 日本大学理工学部学術講演会講演論文集, 353-356.
- 佐藤稔夫・平山善吉・岡田 満 (1978): 南極基地における構造材料としての石膏について (その 7) 付着力を変化させた梁の実験. 日本大学理工学部学術講演会講演論文集, 314-316.
- 佐藤稔夫・平山善吉・岡田 満・滝野 巖 (1979a): 南極基地における構造材料としての石膏について (その 8) ラーメンの実験 1—実験概要. 日本大学理工学部学術講演会講演論文集, 292-294.
- 佐藤稔夫・平山善吉・岡田 満・滝野 巖 (1979b): 南極基地における構造材料としての石膏について (その 9) ラーメンの実験 2—実験結果と計算結果. 日本大学理工学部学術講演会講演論文集, 295-297.
- 佐藤稔夫・平山善吉・岡田 満・滝野 巖 (1979c): 南極基地における構造材料としての石膏について (その 10) ラーメンの実験 3—破壊機構と考察. 日本大学理工学部学術講演会講演論文集, 298-300.
- 石膏石灰学会 (1972): 石膏石灰ハンドブック. 東京, 技報堂, 826 P.
- 滝口克己・岡田謙二・堺 政博 (1975): 付着のある RC 部材と付着のない RC 部材の変形特性. 日本建築学会論文報告集, 249, 1-10.
- 山田 稔 (1976): 鉄筋コンクリート構造物の耐震安全性. 東京, 技報堂, 219 p.
- 山田嘉昭 (1970): マトリックス法の応用. 東京大学出版会, 339 P.
- ZIENKIEWICZ, O. C. and CHEUNG, Y. K. (1967): マトリックス有限要素法. 吉識雅夫監訳 (1970). 東京, 培風館, 312 p.

(1981 年 7 月 22 日受理)